

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Aeronáutica

Modelado y animación en Catia V5 de una máquina de vapor “SPIRIT FIRED KERR-STUART”

Autor: Pablo Fernández Moraga

Tutor: Rafael Ortiz Marín

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Aeronáutica

Modelado y animación en Catia V5 de una máquina de vapor “SPIRIT FIRED KERR-STUART”

Autor:

Pablo Fernández Moraga

Tutor:

Rafael Ortiz Marín

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2025

Proyecto Fin de Carrera: Modelado y animación en Catia V5 de una máquina de vapor “SPIRIT FIRED
KERR-STUART”

Autor: Pablo Fernández Moraga

Tutor: Rafael Ortiz Marín

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal

*Dedicado a la persona que ha hecho posible
que yo haya llegado hasta aquí,
mi madre.*

Agradecimientos

A mi familia, por su apoyo incondicional en todas y cada una de las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

Resumen

Este trabajo fin de máster presenta una reconstrucción digital detallada de la locomotora de vapor Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST, utilizando el *software* CATIA V5 de modelado 3D para crear, ensamblar, renderizar y animar el modelo. Se explora el contexto histórico de las locomotoras de vapor, destacando su importancia tecnológica y su impacto en la historia industrial. El estudio detalla cómo se diseñaron y unieron las partes del modelo digital, utilizando técnicas de renderizado para mejorar su apariencia visual. Además, se crearon animaciones para mostrar cómo funcionaba la locomotora en su tiempo. También se realizó un análisis térmico para entender cómo se precalienta el agua de la locomotora utilizando los gases de escape, utilizando el *software* llamado ANSYS Fluent. Este enfoque combina principios de ingeniería con visualización digital, proporcionando una visión completa de la tecnología de locomotoras de vapor en un entorno de simulación moderno.

Abstract

This master's thesis presents a detailed digital reconstruction of the Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST steam locomotive using CATIA V5 *software* for 3D modeling, assembly, rendering, and animation. It explores the historical context of steam locomotives, emphasizing their technological significance and industrial impact. The study outlines the methodology used to design and assemble the digital model, employing rendering techniques to enhance its visual appeal. Animated sequences illustrate the locomotive's historical operation. Additionally, thermal analysis was conducted to examine how the locomotive's water is heated using exhaust gases, utilizing ANSYS Fluent *software*. This interdisciplinary approach integrates engineering principles with digital visualization, providing a comprehensive study of steam locomotive technology in a modern simulation environment.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xviii
Índice de figuras	xx
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos</i>	1
1.2 <i>Estructura del trabajo</i>	1
2 La máquina de vapor	3
2.1 <i>Principios de funcionamiento</i>	3
2.2 <i>Estado del arte</i>	4
2.2.1 El origen de las máquinas de vapor con Herón de Alejandría en el Siglo I d.C	4
2.2.2 Thomas Savery y el primer motor de vapor comercial	5
2.2.3 Thomas Newcomen y el avance del motor de vapor	6
2.2.4 James Watt y la revolución de las Máquinas de Vapor (1765)	7
2.2.5 George Stephenson y el desarrollo de la Locomotora de Vapor	8
2.2.6 Expansión global de las locomotoras de vapor	10
2.2.7 Declive y legado de las locomotoras de vapor	11
2.3 <i>La Locomotora Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST</i>	12
2.3.1 Historia de la Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST	12
2.3.2 Especificaciones Técnicas	13
2.3.3 Aplicaciones y Uso	13
2.3.4 Partes principales	13
2.3.5 Funcionamiento	14
3 Softwares	19
3.1 <i>¿Qué es CATIA V5?</i>	19
3.1.1 Razones para elegir CATIA V5	19
3.1.2 Aplicaciones específicas en el proyecto	20
3.1.3 Módulos empleados	20
3.2 <i>Otras opciones CAD</i>	21
3.3 <i>¿Qué es ANSYS?</i>	23
3.3.1 Razones para elegir ANSYS	23
3.3.2 Otras opciones CFD	23
3.4 <i>Conclusiones</i>	25

4	Componentes y modelado de piezas	27
4.1	BRAZIL-1-01-UNDER FRAME	28
4.2	BRAZIL-1-02-WHEEL AXLE BEARING	32
4.3	BRAZIL-1-03-CYLINDER:	32
4.4	BRAZIL-1-04-SLIDE VALVE SPINDLE GLAND NUT	35
4.5	BRAZIL-1-05-CYLINDER FRONT COVER	36
4.6	BRAZIL-1-06-CYLINDER REAR COVER	37
4.7	BRAZIL-1-07-STEAM INLET TEE+PIPES	38
4.8	BRAZIL-1-08-STEAM EXHAUST TEE+PIPES	39
4.9	BRAZIL-1-09-CROSSHEAD GUIDE BAR	41
4.10	BRAZIL-1-10-CROSSHEAD GUIDE BAR BRACKET	41
4.11	BRAZIL-1-11-LUBRICATOR	42
4.12	BRAZIL-1-12-SUMP+BURNER	44
4.13	BRAZIL-1-13-TRUNNION BLOCK	46
4.14	BRAZIL-1-14-BUFFER	46
4.15	BRAZIL-2-01-FRONT WHEEL SET	47
4.16	BRAZIL-2-02-REAR WHEEL SET	48
4.17	BRAZIL-2-03-TRAILING WHEEL BOGIE	48
4.18	BRAZIL-2-04-TRAILNG WHEEL SET	51
4.19	BRAZIL-2-05-COUPLING ROD	51
4.20	BRAZIL-2-06-PISTON+CROSSHEAD	51
4.21	BRAZIL-2-07-CON- ROD	53
4.22	BRAZIL-2-08-SLIDE VALVE	54
4.23	BRAZIL-2-09-EXPANSION LINK+SHAFT	55
4.24	BRAZIL-2-10-DIE BLOCK	56
4.25	BRAZIL-2-11-RADIUS BAR	56
4.26	BRAZIL-2-12-SLIDE VALVE CON-ROD	57
4.27	BRAZIL-3-01-FRONT END FOOT PLATE	57
4.28	BRAZIL-3-02-SMOKEBOX SHELL	58
4.29	BRAZIL-3-03-SMOKEBOX DOOR	59
4.30	BRAZIL-3-04-SMOKE STACK	60
4.31	BRAZIL-3-05-PETTICOAT PIPE	61
4.32	BRAZIL-3-06-REAR END FOOT PLATE	61
4.33	BRAZIL-3-07-REAR STEP	62
4.34	BRAZIL-3-08-FUEL TANK	62
4.35	BRAZIL-3-09-FUEL TANK CONTROL VALVE	63
4.36	BRAZIL-3-10-REVERSING LEVER STAND	64
4.37	BRAZIL-3-11-REVERSING LEVER	65
4.38	BRAZIL-3-12-REVERSING LEVER SPRING	65
4.39	BRAZIL-3-13-REACH ROD	66
4.40	BRAZIL-4-01-BOILER SHELL	66
4.41	BRAZIL-4-02-BOILER FLUE PIPE-TYPE-1	68
4.42	BRAZIL-4-03-BOILER FLUE PIPE-TYPE-2	68
4.43	BRAZIL-4-04-BOILER BUSH-TYPE-1	68
4.44	BRAZIL-4-05-BOILER BUSH-TYPE-2	69
4.45	BRAZIL-4-06-STAY-BLOWER PIPE	69
4.46	BRAZIL-4-07-WATER-PRESSURE GAUGE TOP FITTING	70
4.47	BRAZIL-4-08-WATER GAUGE BOTTON FITTING	70
4.48	BRAZIL-4-09-SAFETY VALVE	71
4.49	BRAZIL-4-10-SAFETY VALVE DOME	72
4.50	BRAZIL-4-11-WATER GAUGE	72
4.51	BRAZIL-4-12-WATER GAUGE PIPE NUT	73
4.52	BRAZIL-4-13-FIRE BOX	73
4.53	BRAZIL-4-14-DRY BACKHEAD	74

4.54	BRAZIL-4-15-CLACK VALVE	75
4.55	BRAZIL-4-16-REGULATOR VALVE	75
4.56	BRAZIL-4-17-BLOWER VALVE	76
4.57	BRAZIL-4-18-BLOWER VALVE PIPING	76
4.58	BRAZIL-4-19-BACKHEAD FIRE DOOR	78
4.59	BRAZIL-4-20-STEAM SUPPLY PIPE	78
4.60	BRAZIL-4-21-STEAM SUPPLY MANIFOLD	78
4.61	BRAZIL-4-23-PRESSURE GAUGE	79
4.62	BRAZIL-5-01-SADDLE TANK SHELL	80
4.63	BRAZIL-5-02-SADDLE TANK FILLER CAP	82
4.64	BRAZIL-5-03-SADDLE TANK BALANCING PIPE	82
4.65	BRAZIL-5-04-SADDLE TANK STOP NUT	82
4.66	BRAZIL-5-05-DRIVERS CAB SIDE FRAME	83
4.67	BRAZIL-5-06-DRIVERS CAB BUNKER	83
4.68	BRAZIL-5-07-DRIVERS CAB FRONT PLATE	84
4.69	BRAZIL-5-08-DRIVERS CAB REAR FRAME	84
4.70	BRAZIL-5-09-DRIVERS CAB ROOF	85
4.71	BRAZIL-89mm-RAIL	86
4.72	<i>Diseños propios: Foco delantero y Mecanismo silbato</i>	87
4.72.1	BRAZIL-6-01-FOCUS	87
4.72.2	BRAZIL-6-02-WHISTLE	89
5	Ensamble y renderizado	93
5.1	<i>Proceso Ensamblaje</i>	93
5.2	<i>Proceso Renderizado</i>	95
5.3	<i>Ensamblajes</i>	96
5.3.1	SA-1-101	97
5.3.2	SA-1-102	97
5.3.3	SA-1-105	98
5.3.4	SA-2-201	99
5.3.5	SA-2-202	99
5.3.6	SA-2-203	99
5.3.7	SA-2-205	100
5.3.8	SA-3-301	101
5.3.9	SA-3-302	101
5.3.10	SA-3-303	102
5.3.11	SA-3-304	102
5.3.12	SA-3-305	103
5.3.13	SA-3-310	104
5.3.14	SA-4-401	105
5.3.15	SA-4-402	106
5.3.16	SA-4-405	107
5.3.17	SA-4-410	108
5.3.18	SA-5-501	108
5.3.19	SA-5-502	109
5.3.20	SA-5-505	109
5.3.21	Ensamblaje extra	110
5.4	<i>Renderizado</i>	111
6	Animación	113
6.1	<i>Proceso de Animación</i>	113
7	Estudio térmico	121
7.1	<i>Metodología</i>	121
7.2	<i>Estudio térmico 3D</i>	122
7.2.1	Creación del modelo en Catia V5	122

7.2.2	Creación del proyecto y módulo <i>Geometry</i>	124
7.2.3	Módulo <i>Mesh</i>	126
7.2.4	Módulo <i>Fluent</i>	132
7.3	<i>Estudio térmico 2D</i>	141
7.3.1	Creación del modelo	142
7.3.2	Módulo <i>Mesh</i>	144
7.3.3	Módulo <i>Fluent</i>	146
7.4	<i>Resultados obtenidos</i>	149
7.5	<i>Análisis de los resultados obtenidos</i>	152
8	Conclusiones y desarrollos futuros	154
	Referencias	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Subconjuntos del modelo	27
Tabla 2. Recuentos	28
Tabla 3. Valores tabulados de gases a 773K	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los componentes de una máquina de vapor [7]	4
Figura 2. Eolípila de Herón de Alejandría [11]	5
Figura 3. Motor para elevar el agua mediante el fuego de Thomas Savery [15]	6
Figura 4. Máquina de vapor de Newcomen [17]	7
Figura 5. Máquina de vapor de James Watt [20]	8
Figura 6. Locomotora Rocket de George Stephenson [26]	9
Figura 7. Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST [32]	12
Figura 8. Logo del <i>software</i> CATIA V5 [50]	19
Figura 9. Logo del <i>software</i> AutoCAD [53]	21
Figura 10. Logo del <i>software</i> SolidWorks [55]	22
Figura 11. Logo del <i>software</i> Inventor [57]	22
Figura 12. Logo del <i>software</i> Creo Parametric [59]	22
Figura 13. Logo del <i>software</i> Solid Edge [61]	22
Figura 14. Logo del <i>software</i> OpenFOAM [65]	24
Figura 15. Logo del <i>software</i> COMSOL Multiphysics [67]	24
Figura 16. Logo del <i>software</i> STAR-CCM+ [69]	24
Figura 17. Logo del <i>software</i> Autodesk CFD [71]	25
Figura 18. Esquema general de los componentes del <i>Under Frame</i> [1]	28
Figura 19. Proceso de modelado de la pieza 1-01.1	29
Figura 20. Proceso de modelado de la pieza 1-01.2	29
Figura 21. Proceso de modelado de una escuadra	30
Figura 22. Proceso de modelado de la pieza 1-01.16	30
Figura 23 Proceso de modelado de la pieza 1-01.12	31
Figura 24. <i>Under Frame</i> modelado en Catia V5	31
Figura 25. Esquema general de los componentes del <i>Wheel Axle Bearing</i> [1]	32
Figura 26. Proceso de modelado del <i>Wheel Axle Bearing</i>	32
Figura 27. Esquema de los componentes del <i>Cylinder</i> [1]	33
Figura 28. Proceso de modelado de la pieza 1-03.1	34

Figura 29. Proceso de modelado de la pieza 1-03.4	34
Figura 30. Cylinder modelado en Catia V5	35
Figura 31. Esquema de la <i>slide valve spindle gland nut</i> [1]	35
Figura 32. Proceso de modelado de la <i>slide valve spindle gland nut</i>	36
Figura 33. Esquema de la <i>cylinder front cover</i> [1]	36
Figura 34. Cylinder front cover odelada en CATIA V5	37
Figura 35. Esquema de los componentes de la <i>cylinder rear cover</i> [1]	37
Figura 36. Proceso de modelado de la pieza 1-06.1	38
Figura 37. <i>Cylinder rear cover</i> modelada en CATIA V5	38
Figura 38. Esquema de los componentes de la <i>Steam inlet tee + pipes</i> [1]	38
Figura 39. Pieza 1-07.1 modelada	39
Figura 40. <i>Steam inlet tee + pipes</i> modelado en CATIA V5	39
Figura 41. Esquema de los componentes de <i>steam exhaust tee + pipes</i> [1]	40
Figura 42. <i>Steam exhaust tee + pipes</i> modelado en CATIA V5	40
Figura 43. Esquema de la <i>crosshead guide bar</i> [1]	41
Figura 44. <i>Crosshead guide bar</i> modelado en CATIA V5	41
Figura 45. Esquema [1] y modelado en CATIA V5 de la <i>crosshead guide bar bracket</i>	42
Figura 46. Esquema del <i>Lubricator</i> [1]	42
Figura 47. Proceso de modelado de la pieza 1-11.7 en CATIA V5	43
Figura 48. <i>Lubricator</i> modelado en CATIA V5	43
Figura 49. Esquema del <i>sump + burner</i> [1]	44
Figura 50. Creación de plano tangente para realizar las perforaciones sobre los depósitos	44
Figura 51. Pocesio de modelado del <i>sump</i> en CATIA V5	45
Figura 52. <i>Sump + burner</i> modelado y ensamblado en CATIA V5	46
Figura 53. Esquema [1] y modelado en CATIA V5 del <i>trunnion block</i>	46
Figura 54. Esquema [1] y modelado en CATIA V5 del <i>buffer</i>	46
Figura 55. Esquema del <i>front wheel set</i> [1]	47
Figura 56. Proceso de modelado de la pieza 2-01.2	47
Figura 57. <i>Front wheel set</i> modelado en CATIA V5	48
Figura 58. Esquema [1] y modelado en CATIA V5 del <i>front wheel set</i>	48
Figura 59. Esquema del <i>trailing wheel bogie</i> [1]	49
Figura 60. Porceso de modelado de la pieza 2-03.1	49
Figura 61. Modelado de la pieza 2-03.3	50
Figura 62. <i>Trailing wheel bogie</i> modelado en CATIA V5	50
Figura 63. Esquema [1] y modelado del <i>trailing wheel set</i> en CATIA V5	51
Figura 64. Esquema [1] y modelado del <i>coupling rod</i> en CATIA V5	51
Figura 65. Esquema [1] y modelado del <i>piston + crosshead</i> en CATIA V5	52
Figura 66. Modelado de la pieza 2-06.2	52
Figura 67. Proceso de modelado de la pieza 2-06.4	53

Figura 68. Esquema [1] y modelado del <i>con-rod</i> en CATIA V5	54
Figura 69. Modelado de la pieza 2-07.2	54
Figura 70. Esquema [1] y modelado del <i>slide valve</i> en CATIA V5	55
Figura 71. Proceso de modelado de la pieza 2-08.1	55
Figura 72. Esquema [1] y modelado del <i>expansion link</i> en CATIA V5	56
Figura 73. Esquema [1] y modelado del <i>die block</i> en CATIA V5	56
Figura 74. Esquema [1] y modelado de la <i>radius bar</i> en CATIA V5	57
Figura 75. Esquema [1] y modelado de la <i>slide valve con-rod</i> en CATIA V5	57
Figura 76. Esquema [1] y modelado de la <i>front end foot plate</i> en CATIA V5	58
Figura 77. Esquema [1] y modelado de la <i>smokebox shell</i> en CATIA V5	58
Figura 78. Esquema [1] y modelado de la <i>smokebox door</i> en CATIA V5	59
Figura 79. Modelado de la pieza 3-03.1 en CATIA V5	59
Figura 80. Esquema [1] y modelado de la <i>smoke stack</i> en CATIA V5	60
Figura 81. Modelado de la pieza 3-04.1 en CATIA V5	60
Figura 82. Esquema [1] y modelado de la <i>petticoat pipe</i> en CATIA V5	61
Figura 83. Esquema [1] y modelado de la <i>rear end foot plate</i> en CATIA V5	61
Figura 84. Esquema [1] y modelado de la <i>rear step</i> en CATIA V5	62
Figura 85. Esquema [1] y modelado del <i>fuel tank</i> en CATIA V5	62
Figura 86. Esquema [1] y modelado de la <i>tank control valve</i> en CATIA V5	63
Figura 87. Proceso de modelado de la pieza 3-09.3 en CATIA V5	64
Figura 88. Esquema [1] y modelado del <i>reversing lever stand</i> en CATIA V5	64
Figura 89. Esquema [1] y modelado de la <i>reversing lever</i> en CATIA V5.	65
Figura 90. Esquema [1] y modelado del <i>reversing lever spring</i> en CATIA V5	65
Figura 91. Esquema [1] y modelado de la <i>reach rod</i> en CATIA V5	66
Figura 92. Esquema de la <i>boiler shell</i> [1]	66
Figura 93. Modelado de la pieza 4-01.1 en CATIA V5	67
Figura 94. Modelado de la <i>boiler shell</i> en CATIA V5	67
Figura 95. Esquema [1] y modelado de la <i>boiler flue pipe</i> en CATIA V5	68
Figura 96. Esquema [1] y modelado de la <i>boiler flue pipe-type-2</i> en CATIA V5	68
Figura 97. Esquema [1] y modelado de la <i>Boiler Bush-Type-1</i> en CATIA V5	69
Figura 98. Esquema [1] y modelado de la <i>Boiler Bush-Type-2</i> en CATIA V5	69
Figura 99. Esquema [1] y modelado de la <i>Stay-Blower Pipe</i> en CATIA V5	69
Figura 100. Esquema [1] y modelado de la <i>water-pressure gauge top fitting</i> en CATIA V5	70
Figura 101. Modelado de la pieza 4-07.1 en CATIA V5	70
Figura 102. Esquema [1] y modelado de la <i>water gauge bottom fitting</i> en CATIA V5	71
Figura 103. Esquema [1] y modelado de la <i>safety valve</i> en CATIA V5	71
Figura 104. Esquema [1] y modelado de la <i>safety valve dome</i> en CATIA V5	72
Figura 105. Esquema [1] y modelado de la <i>water gauge</i> en CATIA V5	72
Figura 106. Esquema [1] y modelado de la <i>water gauge pipe nut</i> en CATIA V5	73

Figura 107. Esquema [1] y modelado de la <i>Fire box</i> en CATIA V5	73
Figura 108. Proceso de modelado de la <i>Fire box</i> en CATIA V5	74
Figura 109. Esquema [1] y modelado de la <i>dry backhead</i> en CATIA V5	74
Figura 110. Esquema [1] y modelado de la <i>clack valve</i> en CATIA V5	75
Figura 111. Esquema [1] y modelado de la <i>regulator valve</i> en CATIA V5	75
Figura 112. Esquema [1] y modelado de la <i>blower valve</i> en CATIA V5	76
Figura 113. Proceso de modelado de la pieza 4-17.6 en CATIA V5	76
Figura 114. Esquema [1] y modelado de la <i>blower valve piping</i> en CATIA V5	77
Figura 115. Proceso de moleado de la pieza 4-18.1 en CATIA V5	77
Figura 116. Esquema [1] y modelado de la <i>backhead fire door</i> en CATIA V5	78
Figura 117. Esquema [1] y modelado de la <i>steam supply pipe</i> en CATIA V5	78
Figura 118. Esquema [1] y modelado de la <i>steam supply manifold</i> en CATIA V5	79
Figura 119. Esquema [1] y modelado de la <i>pressure gauge</i> en CATIA V5	79
Figura 120. Esquema de la <i>saddle tank shell</i> [1]	80
Figura 121. Proceso de modelado de la pieza 5-01.4 en CATIA V5	81
Figura 122. Modelado de la <i>saddle tank shell</i> en CATIA V5	81
Figura 123. Esquema [1] y modelado de la <i>saddle tank filler cap</i> en CATIA V5	82
Figura 124. Esquema [1] y modelado de la <i>saddle tank balancing pipe</i> en CATIA V5	82
Figura 125. Esquema [1] y modelado de la <i>saddle tank stop nut</i> en CATIA V5	83
Figura 126. Esquema [1] y modelado del <i>drivers cab side frame</i> en CATIA V5	83
Figura 127. Esquema [1] y modelado del <i>drivers cab bunker</i> en CATIA V5	84
Figura 128. Esquema [1] y modelado del <i>drivers cab front plate</i> en CATIA V5	84
Figura 129. Esquema [1] y modelado del <i>drivers cab rear frame</i> en CATIA V5	85
Figura 130. Esquema [1] y modelado del <i>drivers cab roof</i> en CATIA V5	85
Figura 131. Proceso de modelado del <i>drivers cab roof</i> en CATIA V5	86
Figura 132. Proceso de modelado de la vía en CATIA V5	86
Figura 133. Pieza 6-01.1 modelada	87
Figura 134. Pieza 6-01.2 modelada	87
Figura 135. Pieza 6-01.3 modelada	88
Figura 136. Pieza 6-01.4 modelada	88
Figura 137. Pieza 6-01.5 modelada	88
Figura 138. Foco modelado y ensamblado en CATIA V5	89
Figura 139. Pieza 6-02.1 modelada	89
Figura 140. Pieza 6-02.2 modelada	89
Figura 141. Pieza 6-02.3 modelada	90
Figura 142. Pieza 6-02.4 modelada	90
Figura 143. Pieza 6-02.5 modelada	90
Figura 144. Pieza 6-02.6 modelada	91
Figura 145. Pieza 6-02.7 modelada	91

Figura 146. Pieza 6-02.8 modelada	91
Figura 147. Pieza 6-02.9 modelada	92
Figura 148. Pieza 6-02.10 modelada	92
Figura 149. Mecanismo silbato modelado y ensamblado en CATIA V5	92
Figura 150. Ubicación de <i>Assembly Design</i> en la interfaz de usuario	93
Figura 151. Panel <i>Constraints</i>	94
Figura 152. Panel <i>Manipulation</i>	94
Figura 153. Panel <i>Update</i>	94
Figura 154. Panel <i>Photo Studio Easy Tools</i>	95
Figura 155. Panel de control de fondo, iluminación y sombreado	95
Figura 156. Panel de configuración de renderizado	95
Figura 157. Opción para delimitación de área	96
Figura 158. Opción renderizar	96
Figura 159. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-1-101	97
Figura 160. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-1-102	97
Figura 161. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-1-105	98
Figura 162. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-2-201	99
Figura 163. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-2-202	99
Figura 164. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-2-203	99
Figura 165. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-2-205	100
Figura 166. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-301	101
Figura 167. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-302	101
Figura 168. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-303	102
Figura 169. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-304	102
Figura 170. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-305	103
Figura 171. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-310	104
Figura 172. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-4-401	105
Figura 173. Imagen renderizada del interior del conjunto SA-4-401	106
Figura 174. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-4-402	106
Figura 175. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-4-405	107
Figura 176. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-4-410	108
Figura 177. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-5-501	108
Figura 178. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-5-502	109
Figura 179. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-5-505	109
Figura 180. Imágenes del foco y del mecanismo silbato renderizados	110
Figura 181. Imagen renderizada de la vista frontal y trasera de la locomotora.	111
Figura 182. Imagen renderizada de la vista en planta de la locomotora.	111
Figura 183. Imagen renderizada de la vista lateral de la locomotora.	112
Figura 184. Imagen renderizada de la vista general de la locomotora.	112

Figura 185. Acceso al módulo <i>DMU Kinematics</i>	113
Figura 186. Creación del mecanismo “ANIMACIÓN”	114
Figura 187. Mecanismos del modelo	114
Figura 188. Panel <i>Kinematics Joints</i>	114
Figura 189. Restricción de fijación (<i>Fix Part</i>) en el chasis (ensamblaje SA-1-105)	115
Figura 190. Restricción conducida de revolución (<i>Revolute Joint</i>) en rueda	115
Figura 191. Restricción de deslizamiento (<i>Prismatic Joint</i>) en guiado de pistón	116
Figura 192. Restricción de deslizamiento (<i>Prismatic Joint</i>) entre el <i>Expansion Link</i> y el <i>Die Block</i>	116
Figura 193. Restricción conducida de revolución (<i>Revolute Joint</i>) entre el <i>Expansion Link</i> y el chasis	116
Figura 194. Restricción planar (<i>Planar Joint</i>) entre la válcula deslizante y su compartimento	117
Figura 195. Restricción de conexión (<i>Rigid Joint</i>) entre el chasis y el <i>reversing lever stand</i>	117
Figura 196. Restricción de revolución (<i>Revolute Joint</i>) entre el <i>reversing lever</i> y su accionador	117
Figura 197. Restricción conducida de revolución (<i>Revolute Joint</i>) en el mecanismo silbato	118
Figura 198. Restricción de deslizamiento (<i>Prismatic Joint</i>) en el mecanismo silbato	118
Figura 199. Creación de las simulaciones	119
Figura 200. Interfaz de creación de las secuencias	119
Figura 201. Modelo del tanque y tuberías en CATIA V5	122
Figura 202. Detalle interior del tanque y tuberías	122
Figura 203. Representación del gas caliente en el modelo	123
Figura 204. Representación del agua en el modelo	123
Figura 205. Modelo ensamblado en CATIA V5	123
Figura 206. Vista interior del modelo ensamblado	124
Figura 207. Aplicación de la rotación de 90° en ANSYS	125
Figura 208. Creación de única entidad con <i>Form New Part</i>	125
Figura 209. Definición de las regiones fluidas y sólidas en ANSYS	126
Figura 210. Conexión del módulo <i>Mesh</i>	126
Figura 211. Configuración del mallado	127
Figura 212. <i>Sizing</i> en el borde del dominio del agua	127
Figura 213. <i>Sizing</i> en el borde del dominio del tanque	128
Figura 214. <i>Sizing</i> en el borde del dominio del gas caliente	128
Figura 215. Modelo completo mallado	129
Figura 216. Modelo completo mallado (detalle)	129
Figura 217. Modelo fluido mallado	130
Figura 218. Modelo fluido mallado (detalle)	130
Figura 219. Comprobación de <i>Statistics</i>	130
Figura 220. <i>Element Quality</i>	131
Figura 221. <i>Aspect Ratio</i>	131
Figura 222. <i>Skewness</i>	131
Figura 223. <i>Orthogonal Quality</i>	131

Figura 224. Aplicación de los <i>Named Selections</i>	132
Figura 225. Conexión del módulo Fluent.	132
Figura 226. Configuración de acceso al módulo <i>Fluent</i>	133
Figura 227. Entradas y salidas de flujo en el modelo	133
Figura 228. Activación de <i>Transient</i> y fijación de la gravedad	134
Figura 229. Configuración del modelo viscoso	134
Figura 230. Creación del material " <i>Combustion gas</i> "	136
Figura 231. Fijación de las <i>Cell Zone Conditions</i>	136
Figura 232. Asignación del agua como fluido frío	137
Figura 233. Definición de las <i>Boundary Conditions</i>	137
Figura 234. Fijación de la temperatura de entrada del fluido caliente	138
Figura 235. Cambio del material y selección de condición térmica en interfaces	138
Figura 236. Cambio del material y selección de condición térmica en caras externas	139
Figura 237. Configuración del método de resolución	139
Figura 238. Inicialización estándar de todo el conjunto en 15 °C	140
Figura 239. Creación de animaciones de contornos de temperatura	140
Figura 240. Configuración del tiempo de cálculo	141
Figura 241. Apertura <i>DesignModeler Geometry</i>	142
Figura 242. Opción <i>Sketch</i>	142
Figura 243. Opción <i>Surfaces From Sketches</i>	142
Figura 244. Herramienta <i>Boolean</i>	143
Figura 245. Sección 2D modelada	143
Figura 246. Tres <i>Edge Sizing</i> aplicados en el modelo	144
Figura 247. <i>Face Meshing</i> aplicado en el modelo	145
Figura 248. Dos <i>Face Sizing</i> aplicados en el modelo	145
Figura 249 Detalle de la malla en modelo 2D	146
Figura 250. <i>Named Selections</i> del modelo 2D	146
Figura 251. Condición térmica en <i>hot_fluid_wall</i>	147
Figura 252. Inicialización estándar y aplicación de <i>Patch</i>	147
Figura 253. Parámetros de <i>Run Calculation</i>	148
Figura 254. Evolución de temperatura en sección longitudinal - Estudio 1	149
Figura 255. Evolución de temperatura en secciones transversales - Estudio 1	150
Figura 256. Evolución de temperatura en secciones transversales - Estudio 2	151

1 INTRODUCCIÓN

En el contexto de la ingeniería moderna, el *software* de diseño asistido por computadora (CAD) ha revolucionado la manera en que se conceptualizan, desarrollan y optimizan los productos. Entre las numerosas herramientas disponibles, CATIA V5 destaca como una plataforma integral que ofrece capacidades avanzadas para el modelado, renderizado y animación de componentes y sistemas complejos. Este Trabajo de Fin de Máster se centra en la aplicación de dicho *software* para el modelado, renderizado y animación de una locomotora de vapor, una de las invenciones más icónicas de la Revolución Industrial.

La máquina de vapor, desarrollada inicialmente en el siglo XVIII, no solo transformó la industria, sino que también sentó las bases para el desarrollo de la ingeniería mecánica moderna. Comprender su funcionamiento y diseño es crucial para los ingenieros actuales, ya que muchos principios fundamentales de la termodinámica y la mecánica se derivan de su estudio.

La locomotora de vapor seleccionada para el desarrollo de este proyecto ha sido la Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST. Esta decisión se basa en la disponibilidad de planos detallados en miniatura [1], los cuales ofrecen las dimensiones exactas y la configuración de cada componente de la locomotora. La existencia de estos documentos ha permitido llevar a cabo un modelado meticuloso y exacto, asegurando que el resultado final sea una réplica fiel y funcional de la locomotora histórica.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este TFM es ilustrar cómo las herramientas de CATIA V5 pueden ser empleadas para realizar un modelado detallado, seguido de un renderizado de alta calidad y una animación efectiva, proporcionando una representación visual clara y educativa de la máquina de vapor. Para ello, se realizará:

- **Modelado de componentes:** Creación de los distintos componentes de la locomotora, incluyendo el chasis, las ruedas, la caldera, el tanque de agua, la cabina y los mecanismos de transmisión.
- **Renderizado realista:** Aplicar técnicas de renderizado para generar imágenes de alta calidad del modelo, resaltando detalles como materiales, texturas e iluminación, que permitan una visualización precisa y atractiva del diseño.
- **Animación del funcionamiento:** Desarrollar una animación que muestre el funcionamiento dinámico de la locomotora, ilustrando el movimiento de los componentes y la interacción entre ellos. Esta animación servirá como una herramienta didáctica para comprender mejor los principios operativos de la misma.

1.2 Estructura del trabajo

Para abordar estos objetivos, el trabajo se estructurará en los siguientes capítulos:

1. **Introducción:** Contextualización del proyecto, objetivos y estructura del trabajo.
2. **La máquina de vapor:** Revisión de la literatura y antecedentes históricos sobre la máquina de vapor.
3. **Descripción del *Software*:** Detalle de las funcionalidades y características de CATIA V5, destacando las herramientas específicas utilizadas para el diseño, renderizado y animación.
4. **Modelado de las piezas:** Proceso de creación de los componentes más característicos de la locomotora de

vapor en CATIA V5, incluyendo bocetos, extrusiones y refinamiento de detalles.

5. **Ensamblaje y renderizado:** Metodología para el ensamblaje de las piezas modeladas, asegurando la correcta integración y funcionalidad del conjunto, y técnicas de renderizado aplicadas para obtener imágenes realistas del modelo, incluyendo la aplicación de materiales, texturas y configuración de la iluminación.

7. **Animación:** Desarrollo de la animación que ilustra el funcionamiento de la locomotora, mostrando el movimiento de sus componentes en detalle.

8. **Estudio térmico:** Análisis térmico de una de las piezas críticas de la locomotora, utilizando herramientas de simulación para evaluar su comportamiento.

9. **Conclusiones y desarrollos futuros.**

Al finalizar este proyecto, se obtendrá un modelo tridimensional detallado que puede ser utilizado para diversos fines educativos, de investigación y de entretenimiento.

2 LA MÁQUINA DE VAPOR

Las máquinas de vapor han jugado un papel fundamental en el desarrollo de la ingeniería y la industria desde su invención, impulsando la Revolución Industrial y transformando la sociedad. Este capítulo explora el desarrollo, funcionamiento e impacto de las mismas, desde sus inicios en la antigüedad, con los primeros conceptos de energía a vapor ideados por Herón de Alejandría en el siglo I d.C., hasta inventores pioneros del siglo XVII como Thomas Savery y Thomas Newcomen, que consiguieron que comenzaran a tomar formas prácticas y útiles, y el posterior perfeccionamiento de James Watt.

2.1 Principios de funcionamiento

Las máquinas de vapor operan basándose en los principios de la termodinámica, convirtiendo la energía térmica del vapor en trabajo mecánico [2]. A continuación, se describen el funcionamiento básico de una máquina de vapor y los componentes que la forman:

Generación de vapor

El primer paso en el funcionamiento de una máquina de vapor es la generación de vapor de agua a alta presión en una caldera, la cual es un gran recipiente metálico. Bajo la misma, se quema un combustible (como carbón, madera o petróleo) en una cámara de combustión, generando calor y permitiendo así la evaporización del agua. Al aumentar la temperatura del vapor, incrementa su presión debido a la restricción del espacio en la caldera [3].

Movimiento de los pistones

El vapor de alta presión es dirigido hacia los cilindros de la máquina de vapor, donde su energía térmica se convierte en energía mecánica. Los cilindros contienen pistones que se mueven hacia adelante y hacia atrás (movimiento lineal).

Conversión del movimiento lineal en rotatorio

Para convertir el movimiento lineal alternativo de los pistones en movimiento rotatorio, se utilizan bielas y manivelas [4]. Las bielas conectan los pistones (uno a cada lado de la máquina) a una manivela (una especie de rueda con un eje). A medida que los pistones se mueven hacia adelante y hacia atrás, las bielas mueven las manivelas, transformando el movimiento lineal alternativo en rotación continua [5].

El movimiento de ambos pistones está desfasado 90° . De esta manera, la entrada y salida del vapor a cada pistón no coincide, evitando así instantes de empuje nulo.

Regulación del funcionamiento

Para controlar la velocidad y dirección de la máquina de vapor, se utilizan varios mecanismos de regulación. Entre ellos se encuentran:

- Válvula de regulación: Controla manualmente la cantidad de vapor que ingresa al cilindro, permitiendo al operador ajustar la potencia y la velocidad de la máquina según sea necesario.

- Mecanismo de distribución de vapor (a menudo una válvula deslizante o válvula de corredera): También conocido como inversor de marcha (*Reversing Gear*) o enlace de Stephenson, es un mecanismo compuesto por un sistema de varillas y enlaces que acortan o prolongan la carrera de la válvula deslizante al mover una palanca situada en la cabina. De esta manera se puede controlar el tiempo en el que el cilindro está recibiendo vapor [6].

En el arranque, la posición de la palanca determina la dirección del movimiento, ya que permite controlar si el vapor entra en el cilindro desde un lado u otro del pistón. Una vez la locomotora ha arrancado y se ha vencido la inercia, la palanca de cambio puede moverse a varias posiciones intermedias, lo que también permite un control fino de la velocidad, así como limitar la cantidad de vapor que entra a los cilindros, economizando el vapor y, lógicamente, el agua y el carbón [6].

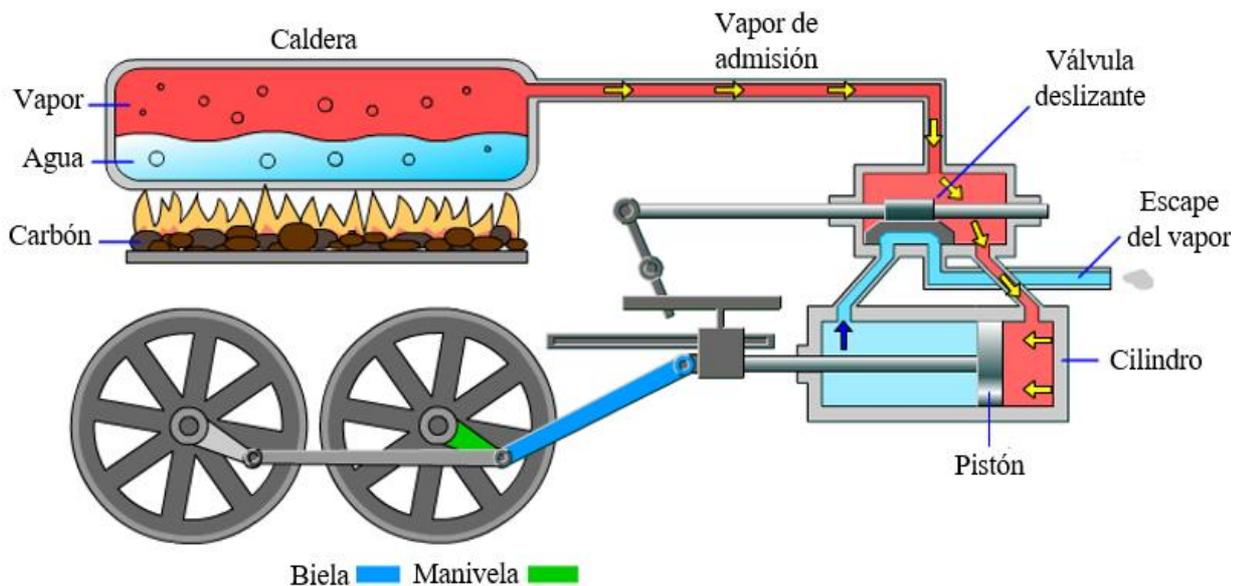


Figura 1. Esquema de los componentes de una máquina de vapor [7]

2.2 Estado del arte

Las máquinas de vapor, tal como las conocemos hoy, son el resultado de siglos de innovación y desarrollo. Sin embargo, sus principios básicos pueden rastrearse hasta el siglo I d.C., cuando Herón de Alejandría, un ingeniero y matemático griego, hizo algunas de las primeras contribuciones documentadas en el uso del vapor como fuente de energía.

Este apartado analiza el desarrollo de las máquinas de vapor y la evolución de esta tecnología.

2.2.1 El origen de las máquinas de vapor con Herón de Alejandría en el Siglo I d.C

Herón fue un ingeniero y matemático helenístico [8] que vivió en Alejandría, Egipto, y es conocido por su obra *Pneumatica* (Neumática), donde describe varias máquinas que funcionan con la presión del aire, el agua y el vapor [9]. Entre estos dispositivos, destaca especialmente la eolípila, considerado por muchos como la primera máquina de vapor de la historia [10]. El eolípila consistía en una esfera hueca montada sobre un pivote, que al calentarse y liberar vapor a través de boquillas orientadas en direcciones opuestas, generaba un movimiento rotatorio de más de 1.000 revoluciones por minuto. Este aparato no tenía utilidad, ya que giraba demasiado rápido y no aprovechaba el vapor de escape, por lo que su función era entretener o asombrar a la gente [10].

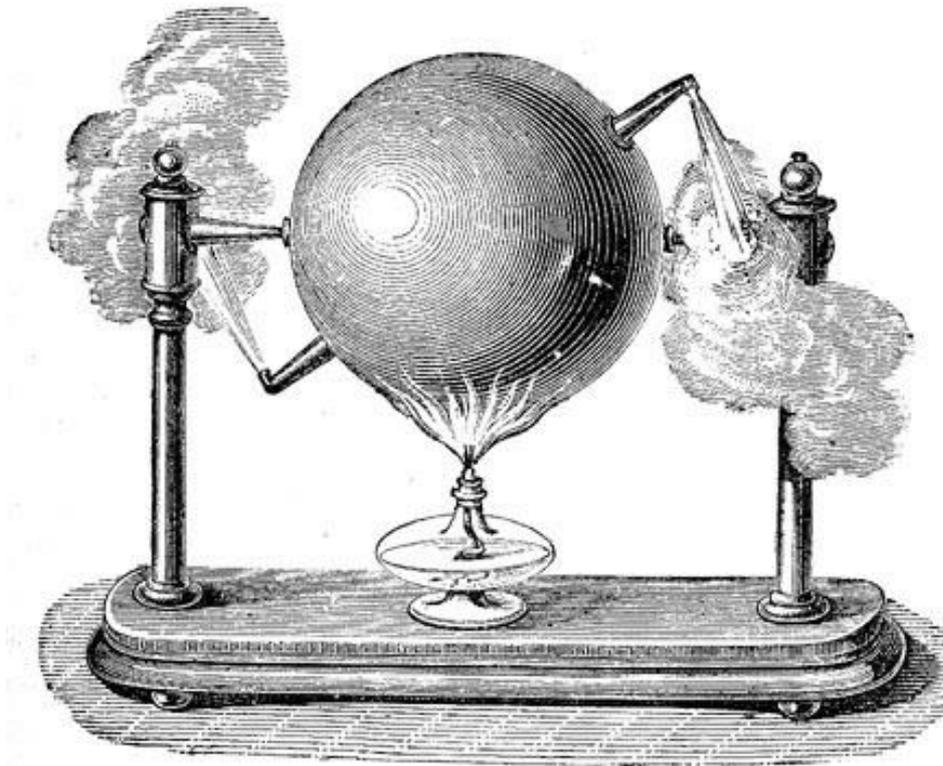


Figura 2. Eolípila de Herón de Alejandría [11]

Aunque la tecnología del vapor no se desarrolló inmediatamente después de Herón, su trabajo fue fundamental para el futuro de la ingeniería. Algunos de sus tratados fueron traducidos al árabe durante la Edad Media y luego al latín [8], lo que permitió que sus ideas sobrevivieran y se difundieran en el mundo islámico y posteriormente en Europa durante el Renacimiento.

2.2.2 Thomas Savery y el primer motor de vapor comercial

Después de los primeros principios establecidos por Herón de Alejandría en el siglo I d.C., el camino hacia el desarrollo de las máquinas de vapor experimentó un prolongado período de estancamiento. Sin embargo, con la llegada de la Revolución Científica y la Revolución Industrial, el interés en aprovechar el poder del vapor resurgió con fuerza.

A finales del siglo XVII, la industria minera enfrentaba graves problemas debido a la acumulación de agua en las minas subterráneas. El desagüe de estas minas era un desafío crítico, ya que las bombas existentes no eran capaces de desarrollar una potencia suficiente para extraer el agua desde las profundidades de la mina [12].

En 1698, Thomas Savery obtuvo la patente de su "Motor para elevar el agua mediante el fuego" [13]. Este dispositivo, aunque rudimentario en comparación con los desarrollos posteriores, representó un avance significativo en la tecnología de su tiempo.

La máquina de Savery utilizaba vapor para crear un vacío que, a su vez, aspiraba agua desde un pozo. El funcionamiento básico del dispositivo [12] era el siguiente:

1. **Generación de vapor:** Se calentaba agua en una caldera, produciendo vapor que se canalizaba hacia un contenedor cerrado (la cámara de vapor).

2. **Creación del vacío:** Al rociar agua fría sobre la cámara de vapor, el vapor se condensaba rápidamente, creando un vacío parcial dentro de la cámara.

3. **Succión de agua:** La presión atmosférica forzaba el agua a subir por una tubería y llenar la cámara de vapor, debido al vacío creado.

4. **Expulsión del agua:** Una vez llena, la cámara se cerraba y se volvía a introducir vapor, forzando el agua hacia arriba y fuera del sistema a través de otra tubería, alcanzando niveles más altos.

A pesar de su ingenio, la máquina de Savery presentaba varias limitaciones importantes. En primer lugar, la máquina era incapaz de levantar agua desde grandes profundidades [14], limitando su eficacia a aplicaciones superficiales. Además, los materiales y la tecnología de la época no podían soportar las altas presiones de vapor necesarias para operaciones más eficientes, lo que incrementaba el riesgo de explosiones [13].

La máquina de Savery, aunque limitada, representó un hito en la historia de las máquinas de vapor. Su invención demostró la viabilidad de utilizar vapor para realizar trabajo mecánico y allanó el camino para futuros desarrollos en tecnología de motores de vapor. Savery también publicó un libro titulado "El amigo del minero" [12], donde detallaba el funcionamiento y las ventajas de su invento, ayudando a difundir sus ideas y conocimientos.

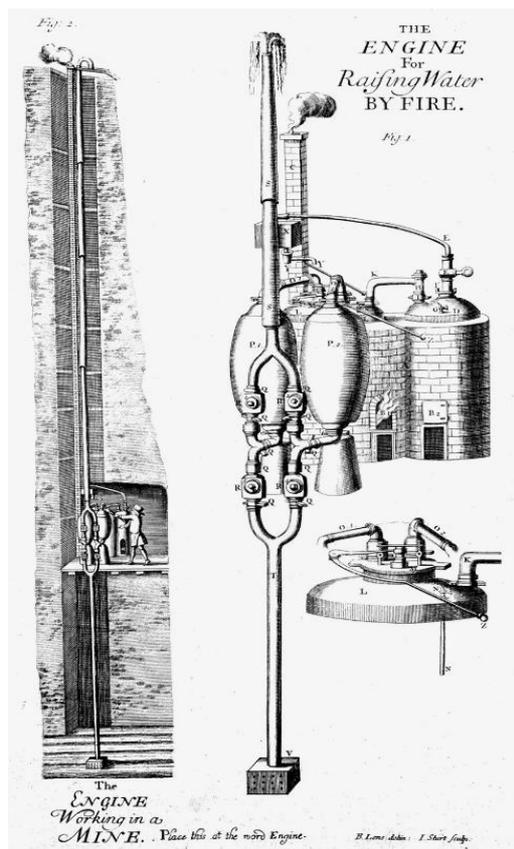


Figura 3. Motor para elevar el agua mediante el fuego de Thomas Savery [15]

2.2.3 Thomas Newcomen y el avance del motor de vapor

Tras los primeros experimentos de Thomas Savery, la evolución de las máquinas de vapor continuó con mejoras significativas introducidas por Thomas Newcomen a principios del siglo XVIII. Newcomen, un herrero y comerciante inglés, hizo avances cruciales en el diseño de motores de vapor, solucionando muchos de los problemas inherentes a las máquinas de Savery. Su motor de vapor, desarrollado en 1712, se considera el primer gran paso de la Revolución Industrial [16].

Trabajando en colaboración con John Calley, desarrolló un motor de vapor que mejoró considerablemente la eficiencia y la practicidad de las máquinas de vapor. A diferencia de la de Savery en la que el propio vacío del depósito era el que absorbía el agua de la mina, en la máquina de Newcomen el vacío se creaba en un cilindro que, conectado a una viga dispuesta en modo balancín, tiraba de la misma hacia abajo [16].

Seguidamente, se llenaba el cilindro con vapor eliminando así el vacío y permitiendo a la viga subir. De este modo, se accionaba una bomba alternativa que extraía el agua de la mina [16]. Este concepto de funcionamiento fue revolucionario en su tiempo.

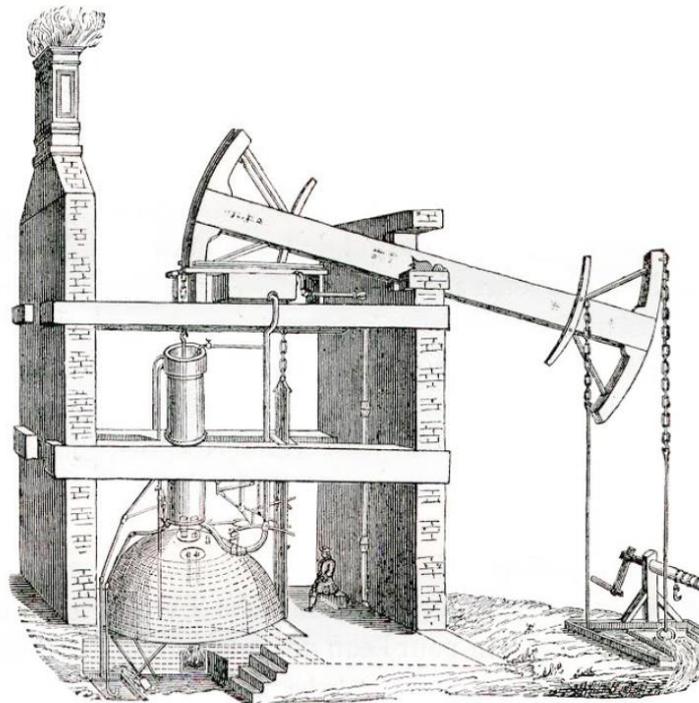


Figura 4. Máquina de vapor de Newcomen [17]

El diseño de Newcomen también estableció principios fundamentales que influirían en inventores posteriores. En particular, el trabajo de Newcomen inspiró a James Watt, quien en 1769 introdujo mejoras adicionales que revolucionaron aún más la tecnología de las máquinas de vapor, como hacer que el vapor condensara en una cámara diferente a la del pistón [18].

2.2.4 James Watt y la revolución de las Máquinas de Vapor (1765)

James Watt, un ingeniero mecánico y químico escocés [18], influenciado por el motor de Newcomen, desarrolló una serie de mejoras que permitieron ahorrar mucho combustible [19], aumentaron significativamente la eficiencia y versatilidad de las máquinas de vapor, con la ayuda de Matthew Boulton.

Watt comenzó a trabajar con las máquinas de vapor de Newcomen en la década de 1763, cuando fue encargado de reparar un modelo en la Universidad de Glasgow. Durante su trabajo, Watt identificó un problema crítico: se perdía parte del potencial del vapor debido a la repetida condensación del mismo dentro del cilindro [19].

En 1765, Watt concibió la idea de un condensador separado [19], que se convertiría en su innovación más famosa y transformadora. Esta modificación esencialmente separaba el proceso de generación de vapor y su condensación en dos componentes distintos:

1. Cilindro de vapor: Donde el vapor movía el pistón.
2. Condensador: Una cámara separada donde el vapor se condensaba sin enfriar el cilindro principal.

Este diseño permitió que el cilindro de vapor permaneciera a una temperatura constante, mejorando significativamente la eficiencia del motor y reduciendo el consumo de combustible.

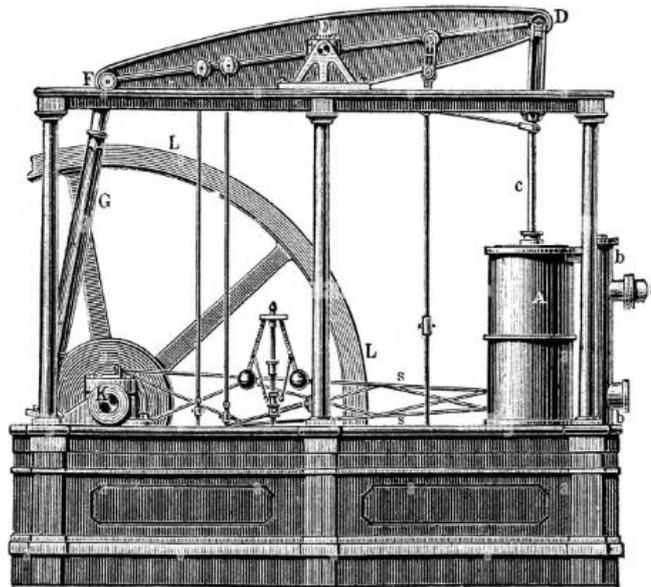


Figura 5. Máquina de vapor de James Watt [20]

Watt, junto con su socio Matthew Boulton, fundó la empresa Boulton & Watt en 1775 para comercializar sus motores de vapor mejorados [18]. A lo largo de las siguientes décadas, Watt introdujo varias mejoras adicionales que optimizaron aún más la eficiencia y funcionalidad de sus motores:

- **Movimiento rotativo:** En 1781, Watt desarrolló un mecanismo para convertir el movimiento alternativo del pistón en un movimiento rotatorio, que denominó "Engranaje Sol y planeta" [19], lo que permitió el uso del motor de vapor en una amplia variedad de aplicaciones industriales, más allá del simple bombeo de agua.
- **Regulador de velocidad centrífugo:** Este dispositivo permitía controlar automáticamente la velocidad del motor, proporcionando una operación más estable y fiable. Empleó uno de los que se utilizaban para controlar automáticamente la velocidad de los molinos de viento [19].
- **Indicador de Watt:** Permitía a los operadores monitorear y ajustar la presión del vapor dentro del cilindro en función de la posición del pistón [19], mejorando la seguridad y la eficiencia del motor.

Las mejoras de James Watt no solo hicieron que los motores de vapor fueran más eficientes y económicos, sino que también ampliaron significativamente su aplicabilidad industrial. Sus motores reemplazaron las ruedas hidráulicas y los caballos de tiro como principales fuentes de energía [19], convirtiéndose en la fuerza impulsora detrás de fábricas, molinos y sistemas de transporte, incluyendo barcos y trenes, lo que facilitó el crecimiento económico y la expansión de la Revolución Industrial.

Watt también introdujo el concepto de "caballo de fuerza" (*horsepower*) como una unidad de medida para comparar la potencia de sus motores con la de los caballos [21], una referencia común en la época.

2.2.5 George Stephenson y el desarrollo de la Locomotora de Vapor

George Stephenson, conocido como el "Padre de los ferrocarriles", fue un ingeniero civil e inventor británico que contribuyó al desarrollo de la locomotora de vapor y las primeras líneas ferroviarias comerciales [22]. Su trabajo no solo revolucionó el transporte terrestre, sino que también tuvo un impacto profundo en la economía y la sociedad del siglo XIX.

A principios del siglo XIX, el transporte terrestre en Inglaterra y en otras partes del mundo industrializado dependía principalmente de caballos y caminos precarios. La locomotora de vapor emergió como una solución prometedora gracias a los avances en la tecnología de vapor, especialmente los desarrollos realizados por

pioneros como James Watt.

George Stephenson nació en 1781 en Wylam, Northumberland, Inglaterra. A pesar de sus humildes orígenes y falta de educación formal, Stephenson mostró una gran aptitud para la mecánica. Trabajó como ingeniero de minas y se familiarizó con las primeras máquinas de vapor utilizadas para bombear agua de las minas [23].

En 1814, Stephenson construyó su primera locomotora, llamada *Blücher*, que podía transportar 30 toneladas de carbón a una velocidad de 6,4 kilómetros por hora en las minas de Killingworth [24]. Aunque rudimentaria, esta locomotora demostró la viabilidad del transporte ferroviario con máquinas de vapor.

2.2.5.1 La Locomotora Rocket y la línea de Stockton y Darlington

El verdadero avance de Stephenson vino con su diseño de la locomotora Rocket, la cual fue creada para competir en las pruebas de Rainhill, organizadas para seleccionar la mejor locomotora para la nueva línea ferroviaria Liverpool y Manchester. Las condiciones de la competición indicaban que debía arrastrar el triple de su peso a una velocidad de 10 millas inglesas por hora y sin producir humo, y salió vencedora al remolcar el quintuple de su peso a la velocidad de 14 hasta 20 millas por hora [25].

Las especificaciones de la Rocket incluyeron varias innovaciones clave [26] :

1. Caldera tubular: Mejoraba la transferencia de calor y la producción de vapor, aumentando la eficiencia del motor.
2. Cilindros cercanos a la horizontal: Evitando el movimiento oscilante irregular a medida que se avanzaba, característico de los alineados verticalmente.
3. Tiro de escape de vapor: Consistía en proporcionar vapor de escape en la base de la chimenea, lo que permitía inducir un vacío parcial y extraer aire a través del fuego.

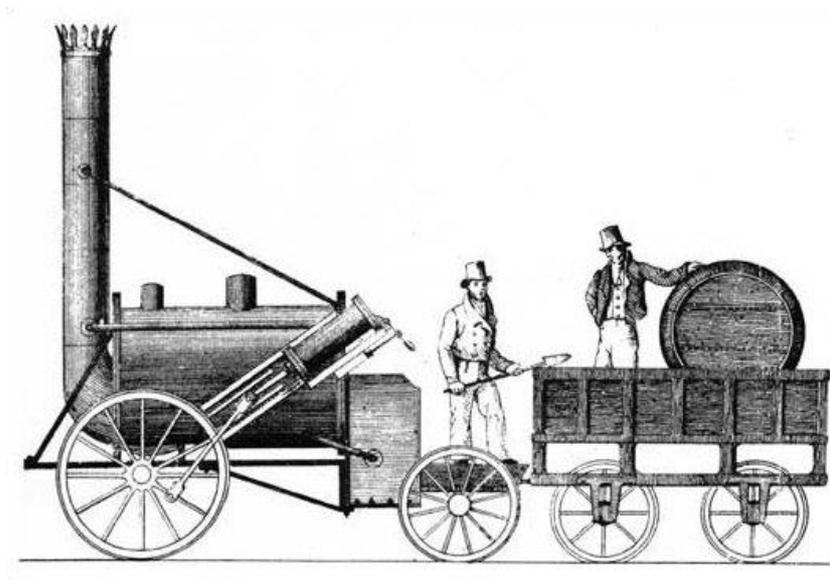


Figura 6. Locomotora Rocket de George Stephenson [26]

2.2.5.2 La línea de Liverpool y Manchester

En 1825, Stephenson fue nombrado ingeniero principal del proyecto para construir la línea ferroviaria de Stockton y Darlington, la primera línea ferroviaria pública en el mundo en utilizar locomotoras de vapor. Sin embargo, su logro más significativo fue la línea Liverpool y Manchester, inaugurada en 1830 [27]. Esta fue la primera línea ferroviaria en ofrecer un servicio regular, programado y confiable para el transporte de pasajeros y mercancías. La construcción de esta línea involucró numerosos desafíos de ingeniería, incluidos puentes,

túneles y viaductos, todos los cuales fueron superados bajo la dirección de Stephenson [27].

En el ámbito del transporte terrestre, la llegada de los trenes afectó notablemente a los operadores de diligencias y carruajes de correo, a las posadas ubicadas en las rutas, a las carreteras y a quienes criaban y cuidaban caballos. Un ejemplo claro de este declive es que, antes del ferrocarril, había 29 diligencias que viajaban diariamente entre Manchester y Liverpool, pero después de la introducción de los trenes, solo quedaron dos en funcionamiento para ese trayecto [28].

También jugó un papel crucial en la estandarización del ancho de vía, adoptando un ancho de 4 pies 8 1/2 pulgadas (1435 mm), conocido como "ancho de vía estándar" [27], que sigue siendo el estándar internacional hoy en día.

El trabajo de Stephenson sentó las bases para la expansión global de los ferrocarriles. Sus diseños e innovaciones fueron adoptados y mejorados por ingenieros en todo el mundo, llevando al desarrollo de redes ferroviarias en otros lugares, como Europa [27].

2.2.6 Expansión global de las locomotoras de vapor

La invención y perfeccionamiento de las locomotoras de vapor transformaron radicalmente el transporte en el siglo XIX y principios del XX, facilitando una expansión global. La capacidad de transportar grandes volúmenes de mercancías y personas a largas distancias de manera rápida y eficiente tuvo un impacto profundo en el comercio, la comunicación y la industrialización en todo el mundo.

Después de los éxitos iniciales de George Stephenson y la apertura de la línea Liverpool y Manchester en 1830, la tecnología de las locomotoras de vapor se difundió rápidamente por Europa. Por ejemplo, en 1835 en Bélgica, se construyó una línea ferroviaria para unir Bruselas y Malinas, siendo la primera de Europa continental [28], facilitando el transporte de materias primas, productos manufacturados y pasajeros, lo que tuvo un impacto profundo en el comercio y la industria:

- Una revolución en el transporte de productos: Desde que en 1825 comenzó a funcionar el primer tren a vapor para el público, el transporte de mercancías cambió por completo. Los trenes ofrecían una manera rápida y barata de mover grandes cantidades de productos de manera terrestre, lo que bajó mucho los costos y acortó el tiempo de entrega. Esto permitió distribuir productos como el carbón, el acero y la comida a una escala nunca vista. Además, ayudó a conectar fábricas con mercados lejanos, lo que impulsó la producción y facilitó el comercio entre diferentes países [29].
- Desarrollo de nuevas industrias: La construcción y operación de ferrocarriles generaron nuevas industrias, como la producción de acero y maquinaria, así como la creación de empleo en la construcción, mantenimiento de infraestructuras ferroviarias, maquinistas, conductores, jefes de estación y cobradores de billetes; también se requirió personal en las estaciones, como porteros, encargados de limpieza y empleados para atender las salas de refrescos [28].
- Uniendo los mercados: Los ferrocarriles también ayudaron a unir los mercados tanto dentro de un mismo país como a nivel internacional. Con los trenes, las empresas podían coordinar mejor la producción y el consumo, lo que estabilizó precios y garantizó que las regiones estuvieran abastecidas. Esta conexión hizo que la economía fuera más sólida y flexible, capaz de responder a las necesidades de diferentes lugares en todo el mundo [29].
- Avances en logística: El ferrocarril dio lugar a muchas de las ideas que hoy forman parte de la logística moderna. La necesidad de planificar los horarios de los trenes y de transportar cargas de forma eficiente fue lo que impulsó los primeros sistemas para organizar el transporte [29].
- Impacto en la sociedad y la cultura: Más allá de la economía y la logística, los trenes también causaron un gran cambio social y cultural. Hicieron que viajar fuera más accesible para mucha gente, lo que facilitó la mezcla de culturas y la difusión de ideas. Además, los trenes se convirtieron en un símbolo de progreso y aventura en la literatura y el arte, apareciendo en numerosas obras que reflejan su importancia en la vida de las personas [29].

2.2.7 Declive y legado de las locomotoras de vapor

2.2.7.1 Transición a Motores de Combustion Interna

A pesar de que a finales del siglo XIX, el ingeniero alemán Nikolaus Otto, desarrolló del motor de explosión a gasolina, no fue hasta principios del siglo XX cuando las locomotoras de vapor, que habían sido la columna vertebral del transporte ferroviario durante más de un siglo, comenzaron a ser gradualmente reemplazadas por tecnologías más avanzadas y eficientes, como son los motores diésel, desarrollados por figuras como Rudolf Diesel [30].

Motores Diésel

Ofrecían varias ventajas significativas sobre las locomotoras de vapor:

- Eficiencia de combustible: Los motores diésel eran mucho más eficientes en términos de consumo de combustible. Mientras que las locomotoras de vapor necesitaban grandes cantidades de carbón y agua, los motores diésel podían operar con mucho menos combustible.
- Mantenimiento reducido: Las locomotoras diésel requerían menos mantenimiento comparado con las de vapor. Las complejas calderas de las locomotoras de vapor necesitaban constantes inspecciones y reparaciones, mientras que los motores diésel eran más fáciles y económicos de mantener.
- Operación simplificada: Con motores diésel, se eliminaba la necesidad de manejar el fuego y controlar la producción de vapor, simplificando la operación del tren.

Paralelamente, los trenes eléctricos comenzaron a emerger como una alternativa viable

Motores Eléctricos

La electrificación de las líneas ferroviarias ofrecía aún más ventajas:

- Potencia y velocidad: Las locomotoras eléctricas podían proporcionar una mayor potencia y velocidad constante, especialmente útil en líneas de alta demanda y rutas de largo recorrido.
- Eficiencia energética: La electricidad permitía una transferencia de energía más eficiente y limpia, especialmente en regiones donde la electricidad podía generarse de fuentes renovables.
- Menor impacto ambiental: A diferencia de las locomotoras de vapor que emitían grandes cantidades de humo y hollín, las locomotoras eléctricas no producían emisiones directas, contribuyendo a la reducción de la contaminación ambiental.
- Operación silenciosa: Las locomotoras eléctricas son significativamente más silenciosas [31].

Hacia la segunda mitad del siglo XX, la mayoría de los sistemas ferroviarios en el mundo habían adoptado estas nuevas tecnologías, relegando las locomotoras de vapor a un uso muy limitado.

A pesar de su declive en el uso comercial, las locomotoras de vapor no han desaparecido del todo. Su legado perdura a través de esfuerzos dedicados a su preservación y el interés nostálgico que evocan.

2.3 La Locomotora Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST

Para este proyecto, se ha seleccionado el modelo de locomotora Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST. Este modelo es representativo de la ingeniería y el diseño de locomotoras industriales a principios del siglo XX, y su elección permite una exploración detallada de las características técnicas y operativas de las máquinas de vapor.

2.3.1 Historia de la Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST

Kerr, Stuart and Company fue una firma británica de fabricación de locomotoras fundada en 1881 y ubicada en Stoke-on-Trent, Inglaterra [32]. La compañía se especializó en la producción de locomotoras industriales y de vía estrecha, que eran ampliamente utilizadas en minas, canteras y plantaciones.

La Brazil Class fue una de las series de locomotoras más exitosas producidas por Kerr-Stuart. Diseñada para trabajos ligeros y medianos, esta clase se caracterizaba por tener un solo *bogie* trasero que permitía situar una caja de fuego de gran tamaño detrás de las ruedas motrices [32]. También destaca por su configuración de ruedas 0-4-2. Esta codificación indica que es una locomotora sin ruedas delanteras, con cuatro ruedas motrices accionadas por dos ejes y con dos ruedas en el *bogie* trasero en un eje [33].

Por otro lado, la codificación contiene una serie de letras tras los números, indicando que es una locomotora de tanque [33]. Las letras o sufijos, empleados son:

- ST, para locomotoras con tanque tipo silla.
- T, para locomotoras de tanque lateral.
- WT, para locomotoras de tanque de pozo.
- RT, para locomotoras de tanque equipada con bastidor.



Figura 7. Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST [32]

Los motivos que han llevado a escoger este modelo para la realización de este TFM han sido:

1. Representatividad histórica: Este modelo encapsula las características de las locomotoras industriales del período, ofreciendo una excelente oportunidad para estudiar la ingeniería y el diseño de la época.
2. Disponibilidad de datos: La disponibilidad de los planos detallados [1] en internet, proporciona una base sólida para el modelado preciso y la simulación virtual de la locomotora, lo que facilita en gran medida el proceso de investigación y análisis.

2.3.2 Especificaciones Técnicas

- Configuración de ruedas: 0-4-2ST [32], lo que le daba una buena tracción y estabilidad en vías industriales de calidad variable.
- Peso en servicio: 10,6 toneladas vacía y 13,6 toneladas en funcionamiento [32].
- Diámetro de las ruedas motrices: 32 pulgadas [1].
- Capacidad del tanque de agua: 1900 litros, aproximadamente.
- Presión de la caldera: 11 bares, aproximadamente, lo que permitía una buena eficiencia en la generación de vapor.
- Fuerza de tracción: Adaptada para tareas industriales, ofreciendo una fuerza de tracción considerable para su tamaño.

2.3.3 Aplicaciones y Uso

Las locomotoras de la clase Brazil fueron utilizadas principalmente en contextos industriales, como:

- Minas y canteras: Transportando mineral y materiales dentro y fuera de las minas.
- Plantaciones: Movilizando caña de azúcar, tabaco y otros productos agrícolas en plantaciones grandes.
- Ferrocarriles industriales y portuarios: Facilitando la carga y descarga de mercancías en puertos y fábricas.

Estas locomotoras eran apreciadas por su robustez, facilidad de mantenimiento y capacidad para operar en las difíciles condiciones de las vías industriales. Su diseño compacto y eficiente las hacía ideales para maniobras en espacios reducidos y para el transporte de cargas relativamente pesadas en distancias cortas.

2.3.4 Partes principales

En este apartado, se describe de manera resumida los diferentes elementos que la componen:

Chasis y ruedas

El chasis de acero constituye la base estructural de la locomotora y soporta todos los componentes críticos. Alberga las cuatro ruedas motrices que proporcionan tracción, junto con un *bogie* trasero que contiene dos ruedas adicionales, mejorando la estabilidad en las curvas [34]. También incluye un depósito que puede utilizarse para distintos combustibles, y tres contenedores cilíndricos para el material inflamable, que alimentan la caldera [35]. Además, en la parte delantera, el chasis contiene un sistema de lubricación, el cual asegura un funcionamiento suave de los cilindros y pistones mediante la adición de aceite en los mismos durante la marcha [36].

Sistema de vapor

El corazón del sistema de propulsión son los dos cilindros, que cuentan con sus respectivas válvulas deslizantes y un sistema de bielas y manivelas [35]. Estos componentes son responsables de transformar la energía del vapor en movimiento mecánico, impulsando las ruedas motrices de la locomotora. Además, la locomotora está equipada con un sistema de inversión de marcha, lo que permite al maquinista cambiar la dirección del desplazamiento y ajustar de manera precisa la velocidad.

Componentes superiores

En la parte frontal de la locomotora se encuentra una cámara de humos que recoge los gases de escape y los

conduce hacia la chimenea [35], lo que contribuye a la eficiencia del proceso de combustión. Tras esta, la caldera tubular es donde se genera el vapor a alta presión, clave para el funcionamiento de la locomotora. Conectada en la parte superior de la misma, existe una válvula de seguridad [35] que se acciona automáticamente si la presión excede los límites de seguridad. Esta válvula se ha aprovechado para que tenga un doble uso, siendo éste que el maquinista pueda usarla para realizar señales acústicas.

Sobre la caldera, dispone de un tanque de agua de tipo silla (como se comentó anteriormente), asegurando un suministro constante de agua para la generación de vapor.

Cabina y controles

La cabina es el espacio de trabajo del maquinista, donde se controlan todos los aspectos operativos de la locomotora [35]. En su interior, se encuentra la cámara de fuego, donde se introduce el material inflamable para su combustión. Aquí también se ubican varias válvulas que permiten controlar la presión de la caldera, el vapor de escape y el vapor que se dirige a los cilindros [35]. Un manómetro permite al maquinista conocer la presión de la caldera, asegurando que se mantenga dentro de los límites seguros.

Adicionalmente, hay otro depósito conectado al depósito de combustible inferior (protegido por el chasis, como se comentó anteriormente) que facilita el suministro del mismo a los depósitos de material inflamable. Dicho depósito cuenta con una bomba manual, utilizada para bombear el combustible hacia los depósitos tubulares, lo que garantiza un suministro adecuado para la generación de vapor.

Para finalizar, una palanca conectada al sistema de inversión de marcha [35], permite al maquinista controlar la dirección y velocidad de la locomotora, proporcionando un manejo preciso durante la operación.

2.3.5 Funcionamiento

Una vez se conocen los elementos que componen la locomotora, se pasa a describir su funcionamiento.

Antes de ponerla en marcha, se debe comprobar tanto por el equipo de mantenimiento como por el propio maquinista, que no existen fugas y que los niveles de agua, aceite y combustible son los adecuados para la maniobra que se desea realizar [37]. Además, es imprescindible que esté exenta de daños que puedan afectar a el correcto funcionamiento de la misma.

Si los niveles indicados son bajos, el acceso a cada uno de estos depósitos está diseñado de forma práctica y accesible.

Para llenar el tanque de agua, hay una puerta en la parte superior del tanque. Este diseño facilita la introducción de agua a través de una manguera.

El combustible, se almacena en un depósito accesible desde la cabina del maquinista. Este depósito dispone de un tapón, lo que permite que el maquinista pueda reponer el combustible de manera rápida y controlada sin necesidad de abandonar la cabina.

Por último, para mantener el lubricador con el nivel adecuado de aceite, existen dos puntos de acceso. Si es necesario drenar el aceite usado, cuenta con un tubo de drenaje en la parte inferior. Este tubo se encuentra en la parte frontal de la locomotora, lo que facilita su acceso desde el exterior. Para llenar el lubricador con aceite nuevo, se debe abrir una pequeña compuerta situada sobre el chasis en la parte frontal, justo delante de la caja de humos. Esta compuerta permite el acceso directo al tapón de sellado del lubricador, facilitando así su llenado con rapidez y seguridad.

2.3.5.1 Encendido y control de combustible en la caja de fuego

Desde la cabina, el maquinista tiene acceso a la caja de fuego a través de una pequeña puerta. Al abrirla, puede inspeccionar visualmente la llama y el estado del combustible, además de ajustar el flujo de aire para asegurar una buena combustión [38]. Este control es esencial para mantener una temperatura constante, la cual permitirá generar suficiente vapor.

La locomotora cuenta en la cabina con una bomba conectada al depósito de combustible, que permite al maquinista ajustar la cantidad del mismo que llega a la caja de fuego. Al accionar esta bomba, el maquinista aumenta el suministro de combustible para aumentar o mantener la potencia.

2.3.5.2 Generación y supervisión de presión en la caldera

A medida que el agua en la caldera absorbe el calor generado en la caja de fuego, comienza a hervir y a transformarse en vapor, acumulándose presión en el interior de la caldera [39]. Para medir y controlar esta presión, el maquinista utiliza un manómetro montado en la cabina. Este manómetro le permite verificar la presión en tiempo real, siendo uno de los indicadores más críticos, ya que una presión demasiado alta puede ser peligrosa.

La caldera tiene una capacidad máxima de presión y, para evitar que la presión aumente peligrosamente, cuenta con una válvula de liberación de vapor [35]. Si el manómetro indica que la presión se acerca a niveles peligrosos, el maquinista puede accionar esta válvula para liberar el exceso de presión. Esto permite que una cantidad de vapor escape hacia la chimenea, disipándose sin peligro.

Por si fuera poco, la locomotora dispone de una válvula de seguridad automática [35]. Se trata de un mecanismo situado fuera de la cabina, sobre la caldera, que sólo se activa si la presión se acerca al límite y el maquinista no la libera manualmente. Esta válvula basa su funcionamiento en un muelle, de modo que si la presión de la caldera excede el límite, vence la resistencia del muelle, que se comprime y deja espacio para la salida del vapor. Lógicamente, la fuerza elástica del muelle es elegida a conveniencia durante la construcción de la locomotora, una vez conocida la presión máxima que puede aguantar la caldera.

Cabe mencionar, que en este proyecto se ha aprovechado la válvula de seguridad para acoplar un mecanismo silbato, como veremos más adelante.

2.3.5.3 Control de flujo de vapor hacia los cilindros

Una vez generada una cantidad adecuada de vapor a alta presión, el maquinista puede regular el flujo de vapor hacia los cilindros. Para ello, dispone de una válvula de admisión en la cabina que le permite ajustar la cantidad de vapor que se dirige hacia los mismos [35].

Cuando el maquinista abre esta válvula, permite que el vapor a alta presión sea redirigido desde la cabina hacia los cilindros mediante una tubería. Esta tubería atraviesa la cámara de fuego y uno de los 3 tubos de la caldera [35] (los cuales constituyen el sistema de precalentamiento del agua) que llevan el gas de la combustión hasta la cámara de humos. De esta manera se consigue que, durante el trayecto del vapor desde la cabina hasta los cilindros, no se produzcan pérdidas de calor, al estar la tubería en contacto exterior con el gas caliente.

Una vez en la cámara de humos, el vapor se dirige hacia los dos cilindros (uno a cada lado), donde empujará los pistones. La fuerza ejercida por el vapor en los pistones es la que genera el movimiento de las ruedas, impulsando la locomotora hacia adelante. Pero no todo el vapor es dirigido a los cilindros. Una pequeña parte se introduce en el lubricador para que aporte el aceite necesario que garantiza la suavidad del movimiento de los pistones dentro de los cilindros y reduce la fricción y el desgaste [36].

2.3.5.4 Movimiento del pistón y alternancia de la válvula deslizante

Dentro de cada cilindro, se encuentra un pistón que puede moverse de un extremo al otro en respuesta a la presión del vapor. Para controlar esta entrada de vapor en los cilindros y permitir que el pistón se mueva, el sistema cuenta con una válvula de deslizamiento [35].

Ciclo de funcionamiento del pistón:

- Primera fase: Cuando el maquinista permite la entrada de vapor, el vapor a alta presión entra en el cilindro por un extremo, empujando el pistón hacia el otro extremo del cilindro [40].
- Cambio de dirección: Una vez que el pistón llega a un extremo, la válvula deslizante cambia de posición,

permitiendo que el vapor entre por el otro lado del pistón [40]. Este cambio en el flujo de vapor permite que el pistón sea empujado de vuelta en la dirección opuesta.

- Expulsión del vapor: A medida que el pistón se mueve, el vapor que queda en el cilindro es expulsado por el extremo opuesto hacia el escape y sale por la chimenea [40].

Este proceso cíclico, donde la válvula deslizante cambia la entrada del vapor de un lado al otro, permite un movimiento alternativo del pistón de ida y vuelta, que genera la energía mecánica necesaria para mover la locomotora.

2.3.5.5 Control de dirección y velocidad: La palanca de reversa (*Reversing Lever*)

La palanca de reversa permite al maquinista controlar la posición de la válvula deslizante que se encuentra sobre los cilindros de la locomotora. Esta válvula deslizante es responsable de dirigir el flujo de vapor hacia uno u otro lado del pistón en el cilindro. Al cambiar la posición de la válvula, se controla la dirección del movimiento del pistón y, por lo tanto, de la locomotora [41].

Selección de dirección al arrancar

Cuando la locomotora está en reposo, el maquinista utiliza la palanca de reversa para seleccionar la dirección en la que se moverá la locomotora al enviar vapor a los cilindros. Moviendo la palanca hacia adelante o hacia atrás, ajusta la posición de la válvula deslizante para que el vapor entre en el cilindro desde el lado correspondiente y así pueda empujar el pistón en la dirección deseada [42].

Control de velocidad y eficiencia en movimiento

Además de elegir la dirección, la palanca de reversa también permite al maquinista ajustar la cantidad de apertura de la válvula deslizante.

- Palanca hacia adelante o hacia atrás en su posición máxima: Al arrancar, permite una mayor entrada de vapor en el cilindro, lo que maximiza la potencia inicial y facilita el arranque[41].

- Reducción del ángulo de la palanca: A medida que la locomotora alcanza velocidad, reduce la cantidad de vapor admitida en cada ciclo del pistón [41]. Esto hace que la locomotora sea más eficiente en consumo de vapor y permite al maquinista ajustar la velocidad con precisión.

Frenado mediante la palanca de reversa

El maquinista también puede usar la palanca de reversa como parte del sistema de frenado. Al reducir o incluso invertir la dirección de entrada de vapor en los cilindros mientras la locomotora está en movimiento, el vapor puede actuar como resistencia y ayudar a desacelerar o frenar la locomotora.

2.3.5.6 Conexión del pistón a las ruedas: La biela, la manivela y la biela de acoplamiento

Cada cilindro de la locomotora está conectado a dos ruedas motrices (las del lado donde está situado el cilindro) mediante un sistema de bielas, manivelas y barras de acoplamiento:

- Biela: La biela es una barra rígida que une el pistón al eje de las ruedas motrices más cercanas. Su función es transmitir el movimiento alternativo (lineal) del pistón hacia la manivela de las ruedas [43].
- Manivela: La manivela está unida al eje de las ruedas motrices y convierte el movimiento alternativo en un movimiento circular [43]. Cuando la biela empuja o tira, la manivela hace girar el eje y, con ello, las ruedas.
- Biela de acoplamiento: Transmite el movimiento rotatorio de la rueda motriz delantera a la trasera, garantizando que ambas ruedas giren al mismo tiempo y la misma velocidad [44].

Sincronización de los cilindros

Para que la locomotora se mueva de manera estable y continua, la locomotora tiene dos cilindros, uno en cada lado. Estos cilindros están desfasados 90 grados entre sí [45], lo que significa que cuando un pistón está en su punto máximo de empuje, el otro está en la mitad de su carrera. Este desfase garantiza que siempre haya un empuje constante, evitando paradas o retrocesos indeseados.

2.3.5.7 Sistema de alivio de vapor: Escape y chimenea

El escape de vapor cumple también una función de seguridad y eficiencia. Al expulsar el vapor usado a través de la chimenea, se crea una succión o efecto de vacío en la caldera que ayuda a extraer los gases de combustión de la caja de fuego [46]. Esto asegura que haya suficiente oxígeno para la combustión, evitando que se acumule humo o gases peligrosos en la caldera.

2.3.5.8 Silbato (Whistle): Señales acústicas

El silbato es un mecanismo que utiliza la presión de vapor de la caldera y está acoplado a la válvula de seguridad situada sobre ella, como se mencionó anteriormente. Este sistema permite al maquinista activar el silbato de manera sencilla desde la cabina. Para accionarlo, utiliza una palanca de fácil acceso; al tirar hacia abajo de esta palanca, su otro extremo se eleva y, al hacerlo, activa la válvula comprimiendo el muelle que la mantiene cerrada. De esta manera, se abre una pequeña abertura en la válvula, permitiendo que el vapor contenido en la caldera, a alta presión, escape hacia el exterior.

Este vapor saliente se desplaza rápidamente a través del orificio, creando una vibración que produce el sonido característico del silbato [47]. El sonido agudo y fuerte que genera es ideal para funcionar como señal de advertencia o para transmitir comunicaciones a larga distancia, tanto a trabajadores en las vías como a personas o vehículos en los cruces de trenes. Cuando el maquinista suelta la palanca, el muelle empuja la válvula hacia abajo, cerrando la abertura y deteniendo la salida de vapor, con lo que el silbato se apaga inmediatamente. Así, el maquinista tiene un control total sobre la duración y frecuencia del sonido del silbato, permitiéndole emitir señales en el momento necesario y de la duración requerida.

3 SOFTWARES

Para el desarrollo del Trabajo de Fin de Máster (TFM) sobre el análisis de la locomotora de vapor Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST, se ha optado por utilizar dos herramientas líderes en la ingeniería: CATIA V5 para el modelado detallado y ANSYS para el estudio térmico.

3.1 ¿Qué es CATIA V5?

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application) es un *software* de diseño asistido por computadora (CAD) desarrollado por Dassault Systèmes [48]. CATIA V5 es una de las versiones más utilizadas en la industria debido a sus amplias capacidades de modelado, análisis y simulación. Es especialmente valorado en sectores como la mecánica, la aeroespacial, maquinaria industrial y muchos otros [49].



Figura 8. Logo del *software* CATIA V5 [50]

3.1.1 Razones para elegir CATIA V5

La elección de CATIA V5 para este proyecto se basa en varias razones clave que destacan sus ventajas y capacidades únicas:

1. **Capacidades avanzadas de modelado 3D:** CATIA V5 ofrece diversidad de herramientas y características para crear diseños complejos y detallados [51]. Esta capacidad es crucial para el proyecto, ya que permite replicar con exactitud la estructura y los componentes de la locomotora Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST.
2. **Simulación de movimiento y cinemática:** dispone del módulo *DMU Kinematics*, que se utiliza para simular el movimiento de mecanismos, permitiéndoles ver su movimiento y analizar los resultados [51]. Estas funciones permiten simular el funcionamiento de los componentes móviles de la locomotora, como los pistones y las válvulas, proporcionando una visualización clara de su operativa y ayudando a identificar posibles mejoras en el diseño.
3. **Interoperabilidad y gestión de datos:** CATIA V5 es conocido por su capacidad de interoperabilidad con otros *software* de ingeniería y diseño, facilitando la integración y comunicación fluida entre diversos sistemas, herramientas y formatos de datos [52]. Además, su robusto sistema de gestión de datos permite mantener un control riguroso sobre las versiones y modificaciones del modelo, asegurando la integridad y precisión del proyecto a lo largo del tiempo.
4. **Herramientas de documentación y presentación:** Las capacidades de documentación y presentación de CATIA V5 permiten generar planos técnicos, vistas y animaciones que pueden ser utilizadas para la comunicación de resultados y la enseñanza.
5. **Amplia comunidad y soporte:** CATIA V5 cuenta con una extensa base de usuarios y una sólida red de soporte técnico. Esto garantiza acceso a recursos educativos, foros de discusión y actualizaciones continuas, lo que facilita la resolución de problemas y la mejora continua del proyecto.

3.1.2 Aplicaciones específicas en el proyecto

Durante el desarrollo del TFM, CATIA V5 se utilizará para varias tareas específicas que destacan sus capacidades:

- Modelado detallado de la locomotora: Creación de un modelo 3D preciso de la Kerr-Stuart Brazil Class 0-4-2ST, incluyendo todos sus componentes principales.
- Animaciones de funcionamiento: Creación de animaciones que demuestren el funcionamiento interno de la locomotora, utilizadas para fines educativos y de divulgación.
- Renderizado y visualización: Creación de imágenes fotorrealistas y vídeos para presentación y divulgación.

3.1.3 Módulos empleados

3.1.3.1 Mechanical Design

El módulo *Mechanical Design* se usa para crear y desarrollar piezas y ensamblajes mecánicos en 3D. Proporciona herramientas para diseñar, modificar y analizar componentes, ayudando a los ingenieros a asegurar que sus diseños sean precisos y eficientes desde la idea inicial hasta la producción final.

Part Design

En CATIA V5, el módulo *Part Design* se utiliza para crear modelos 3D de piezas individuales. Las principales opciones y sus funciones son:

- *Sketcher*: Permite dibujar perfiles en 2D que sirven como base para crear formas 3D.
- *Pad*: Extruye un perfil 2D a lo largo de una dirección para crear un sólido.
- *Shaft*: Permite crear sólidos por revolución.
- *Pocket*: Remueve material linealmente de un sólido siguiendo el perfil 2D seleccionado.
- *Groove*: Remueve material circularmente de un sólido siguiendo el perfil 2D seleccionado.
- *Hole*: Crea agujeros en una pieza, con opciones para diferentes tipos de agujeros y sus parámetros.
- *Fillet*: Redondea las aristas de una pieza para suavizar las transiciones.
- *Chamfer*: Bisela aristas de una pieza para crear bordes angulados.
- *Translate*: Desplaza objetos geométricos o cuerpos en el espacio según una dirección y distancia especificadas.

Estas herramientas permiten a los diseñadores construir y refinar componentes detallados, asegurando precisión y funcionalidad en los diseños finales.

Assembly Design

El sub-módulo *Assembly Design* permite el diseño de ensamblajes y uniones de diferentes piezas individuales para formar conjuntos, subconjuntos o mecanismos. Los diferentes componentes de un conjunto se ensamblan mediante la aplicación de restricciones paramétricas. Las herramientas más frecuentemente utilizadas del módulo *Assembly Design* se listan a continuación, junto a una breve descripción de cada una de ellas.

- *Existing Component*: Permite introducir una nueva pieza, previamente creada, en el conjunto.
- *Manipulation*: Permite mover uno o varios elementos en el espacio tridimensional.
- *Coincidence Constraint*: Introduce una restricción de coincidencia de ejes.

- *Contact Constraint*: Introduce una restricción de contacto entre dos superficies.
- *Offset Constraint*: Introduce una restricción de separación entre superficies, ejes o líneas.
- *Angle Constraint*: Introduce una restricción de ángulo entre superficies, ejes o líneas.
- *Fix Component*: Fija la ubicación de uno o varios elementos en el espacio tridimensional.

3.1.3.2 Digital Mockup

El módulo *Digital Mockup* permite la caracterización de un modelo tridimensional durante todo su ciclo de vida, permitiendo el diseño y configuración de productos complejos sin necesidad de construir modelos físicos.

DMU Kinematics

El sub-módulo DMU Kinematics está dedicado a la simulación de movimientos en un ensamblaje. Así, permite caracterizar cinemáticamente un conjunto formado por varias piezas interactuando entre sí, pudiendo así simular el comportamiento mecánico y dinámico de un diseño. Sus herramientas principales se describen a continuación:

- *Revolute Joint*: Permite el giro entre dos piezas.
- *Prismatic Joint*: Permite el movimiento rectilíneo entre dos piezas, actuando una de ellas como guía o carril.
- *Rigid Joint*: Permite unir dos piezas entre sí, de forma que ambas se muevan como un conjunto.
- *Cylindrical Joint*: Permite la rotación y/o traslación entre dos piezas, alrededor de un eje.
- *Simulation*: Permite simular el mecanismo de estudio dentro de los rangos definidos para los grados de libertad del mismo.
- *Compile Simulation*: Permite compilar y almacenar la simulación del mecanismo de estudio, bien para su reproducción dentro del módulo o para su exportación como archivo de vídeo.
- *Simulation Player*: Permite reproducir, dentro del módulo *DMU Kinematics*, una simulación previamente creada y compilada.

3.2 Otras opciones CAD

Además de CATIA V5, el *software* CAD utilizado en la industria ofrece una variedad de opciones que se adaptan a diferentes necesidades y presupuestos. A continuación se mencionan algunas de las alternativas más conocidas:

1. **AutoCAD**: AutoCAD, desarrollado por Autodesk, es un software internacionalmente reconocido por su amplia gama de herramientas de edición, que permiten crear planos digitales detallados de edificaciones y maquinarias, así como modelos tridimensionales a partir de dibujos en 3D [53]. Este programa ofrece una interfaz intuitiva junto con herramientas avanzadas para el diseño.



Figura 9. Logo del *software* AutoCAD [53]

2. **SolidWorks**: Desarrollado actualmente por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, este

software es conocido por su facilidad para modelar tanto piezas individuales como ensamblajes, permitiendo además la generación de planos técnicos y otros datos esenciales para el proceso de fabricación [54].



Figura 10. Logo del *software* SolidWorks [55]

3. **Inventor:** Otra solución de Autodesk, es un software de diseño asistido por computadora que se especializa en el modelado mecánico en 3D. Permite a los usuarios realizar simulaciones, visualizaciones y generar documentación técnica de manera eficiente [56].



Figura 11. Logo del *software* Inventor [57]

4. **Creo Parametric:** Ofrece todas las ventajas esperadas de un software de modelado 3D de un líder en la industria, además de características innovadoras como fabricación aditiva, Model-Based Definition (MBD), diseño generativo, realidad aumentada, y diseño inteligente y conectado. Su interfaz de usuario es intuitiva y sus flujos de trabajo están optimizados, lo que enriquece la experiencia del usuario y mejora la eficiencia en el proceso de diseño [58].



Figura 12. Logo del *software* Creo Parametric [59]

5. **Solid Edge:** Desarrollado y propiedad de SIEMENS, es un software de diseño asistido por computadora (CAD) que permite el modelado paramétrico de piezas en 3D. Este programa facilita la creación de modelos a partir de diversos materiales, así como el doblado de chapas, ensamblajes de conjuntos y funciones de soldadura. También ofrece herramientas de dibujo en plano, dirigido a ingenieros, diseñadores y proyectistas [60].



Figura 13. Logo del *software* Solid Edge [61]

Estas herramientas CAD son utilizadas en una variedad de industrias para facilitar el diseño, análisis y fabricación de productos. Cada una ofrece características únicas que las hacen adecuadas para diferentes tipos de proyectos y requisitos específicos de la industria. La elección del *software* CAD adecuado depende de factores como el tipo de diseño, la complejidad del proyecto, las necesidades de colaboración y la integración con otros sistemas de la empresa.

3.3 ¿Qué es ANSYS?

ANSYS es un *software* líder en simulación CAE multifísico para análisis y simulación por elementos finitos (FEA). Permite abarcar las fases de pre-proceso, resolución y post-proceso en un único entorno de trabajo. Este software se utiliza para realizar análisis de componentes o conjuntos en ingeniería y diseño mecánico, evaluando su comportamiento bajo diferentes fenómenos físicos, ya sea de manera individual o simultánea. Ansys permite simular una variedad de condiciones, lo que facilita la optimización del diseño y la verificación de la integridad de los materiales en diversas aplicaciones [62].

Entre las características principales de ANSYS se encuentran:

1. **Análisis *multiphysics*:** Integra las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y fluido-mecánicas en una única interfaz, lo que permite a los usuarios realizar proyectos completos que abarcan desde el diseño inicial hasta la simulación final [63].
2. **Amplia biblioteca de elementos:** Proporciona una amplia gama de elementos finitos y volúmenes finitos para modelar geometrías complejas y variadas condiciones de carga y frontera.
3. **Interfaz gráfica intuitiva:** Cuenta con una interfaz gráfica intuitiva que facilita la creación de modelos, la configuración de simulaciones y la visualización de resultados.
4. **Herramientas de post-procesamiento avanzadas:** Permite analizar y visualizar los resultados de las simulaciones de manera detallada, incluyendo gráficos, animaciones y tablas de datos.

En resumen, ANSYS es una herramienta poderosa y versátil que permite a los ingenieros y científicos realizar simulaciones virtuales precisas y detalladas de una amplia variedad de sistemas y fenómenos físicos, lo que contribuye significativamente al diseño, la optimización y la comprensión de sistemas ingenieriles en diversos campos de aplicación.

3.3.1 Razones para elegir ANSYS

ANSYS es una opción destacada para realizar estudios térmicos debido a sus capacidades avanzadas y versatilidad en la simulación. Algunas de las razones para escogerla son:

1. **Precisión y fiabilidad:** Utiliza métodos de elementos finitos (FEM) altamente avanzados para proporcionar resultados precisos y confiables en estudios térmicos.
2. **Amplia gama de materiales y condiciones:** El *software* incluye una extensa biblioteca de propiedades de materiales y permite definir condiciones de frontera y cargas térmicas complejas.
3. **Interfaz intuitiva:** Ofrece una interfaz de usuario intuitiva y herramientas de visualización avanzadas, facilitando la configuración de modelos y la interpretación de resultados.
4. **Soporte y comunidad:** Cuenta con una sólida red de soporte y una comunidad global de usuarios, lo que facilita el acceso a recursos y soluciones a problemas específicos.

3.3.2 Otras opciones CFD

Además de ANSYS, el *software* CFD utilizado en la industria ofrece una variedad de opciones que se adaptan a diferentes necesidades y presupuestos. A continuación se mencionan algunas de las alternativas más conocidas:

1. **OpenFOAM:** Es un software de código abierto diseñado para analizar el comportamiento de los fluidos. Este programa tiene diversas aplicaciones para abordar problemas relacionados con la dinámica de fluidos, incluyendo reacciones químicas, turbulencias, transferencia de calor y electromagnetismo. Es una herramienta para resolver ecuaciones diferenciales parciales, en lugar de ser únicamente un paquete de CFD en el sentido tradicional [64].



Figura 14. Logo del *software* OpenFOAM [65]

2. **COMSOL Multiphysics:** Anteriormente conocido como FEMLAB, es un software de análisis que utiliza el método de elementos finitos para resolver una variedad de problemas físicos y de ingeniería, especialmente aquellos que involucran fenómenos acoplados. Ofrece una interfaz robusta con MATLAB y sus toolboxes, lo que permite una programación flexible y un manejo eficiente de datos. Permite la entrada de sistemas de ecuaciones en derivadas parciales, pudiendo hacerse de forma directa o a través de la formulación débil [66].



Figura 15. Logo del *software* COMSOL Multiphysics [67]

3. **STAR-CCM+:** Es un software de simulación comercial desarrollado por *CD-adapco* y *Siemens Digital Industries Software*, centrado en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Permite modelar y analizar diversos problemas de ingeniería relacionados con el flujo de fluidos, la transferencia de calor, el estrés, el flujo de partículas y el electromagnetismo, entre otros fenómenos [68].



Figura 16. Logo del *software* STAR-CCM+ [69]

4. **Autodesk CFD:** Es una herramienta de dinámica de fluidos computacional diseñada para simular el comportamiento de fluidos en diversos escenarios. En este contexto, el software permite a los usuarios modelar y analizar flujos de fluidos complejos y fenómenos térmicos asociados, tales como la conducción, convección y radiación [70]. Esta capacidad de simulación CFD es útil en aplicaciones que requieren un análisis detallado de los movimientos y las interacciones de los fluidos, como en los estudios de aerodinámica, ventilación y sistemas de refrigeración.



Figura 17. Logo del *software* Autodesk CFD [71]

Este tipo de software permite optimizar el diseño de productos y componentes para mejorar el rendimiento aerodinámico, la eficiencia térmica, y la eficacia de los sistemas de flujo de fluidos como turbinas, automóviles, aviones, y dispositivos médicos.

3.4 Conclusiones

La elección de CATIA V5 se justifica por sus capacidades avanzadas de modelado, análisis y simulación, así como por sus herramientas de documentación y presentación. Estas características la hacen una herramienta indispensable para el estudio detallado y la preservación del conocimiento técnico de las máquinas de vapor históricas, proporcionando valiosas lecciones y aplicaciones para el diseño moderno de sistemas mecánicos.

Por otro lado, la elección de ANSYS para el estudio térmico se justifica por sus capacidades avanzadas, su reputación en la industria y su fiabilidad probada. Al aprovechar sus herramientas y funcionalidades, se espera obtener resultados precisos y significativos que contribuyan al estudio y la comprensión del comportamiento térmico del sistema de precalentamiento de la locomotora.

4 COMPONENTES Y MODELADO DE PIEZAS

En este capítulo, se abordará el proceso detallado de creación de modelos tridimensionales de los componentes individuales de la locomotora utilizando el *software* CATIA V5.

El objetivo de este capítulo es proporcionar una visión completa y sistemática del proceso de modelado, destacando los métodos y técnicas utilizados para lograr una representación precisa y detallada de las piezas.

La siguiente tabla presenta una lista detallada de los subconjuntos que conforman la locomotora, indicando la cantidad requerida de cada uno (Columna 1 - QTY), sus respectivos *part numbers* (Columna 2 – P.N.), el nombre (Columna 3 - NAME) y la cantidad de piezas individuales que conforman cada subconjunto (Columna 4 - PCS).

QTY	P.N.	NAME	PCS
1	1-01	UNDER FRAME	26
4	1-02	WHEEL AXLE BEARING	1
2	1-03	CYLINDER	7
2	1-04	SLIDE VALVE SPINDLE GLAND NUT	1
2	1-05	CYLINDER FRONT COVER	1
2	1-06	CYLINDER REAR COVER	4
1	1-07	STEAM INLET TEE+PIPES	8
1	1-08	STEAM EXHAUST TEE+PIPES	9
2	1-09	CROSSHEAD GUIDE BAR	1
2	1-10	CROSSHEAD GUIDE BAR BRACKET	1
1	1-11	LUBRICATOR	9
1	1-12	SUMP+BURNER	15
2	1-13	TRUNNION BLOCK	2
2	1-14	BUFFER	2
1	2-01	FRONT WHEEL SET	11
1	2-02	REAR WHEEL SET	11
1	2-03	TRAILING WHEEL BOGIE	11
1	2-04	TRAILING WHEEL SET	5
2	2-05	COUPLING ROD	5
2	2-06	PISTON+CROSSHEAD	4
2	2-07	CON- ROD	4
2	2-08	SLIDE VALVE	5
1	2-09	EXPANSION LINK+SHAFT	10
2	2-10	DIE BLOCK	2
2	2-11	RADIUS BAR	2
2	2-12	SLIDE VALVE CON-ROD	2
1	3-01	FRONT END FOOT PLATE	5
1	3-02	SMOKEBOX SHELL	10
1	3-03	SMOKEBOX DOOR	3
1	3-04	SMOKE STACK	3
1	3-05	PETTICOAT PIPE	2
1	3-06	REAR END FOOT PLATE	1
2	3-07	REAR STEP	1
1	3-08	FUEL TANK	8
1	3-09	FUEL TANK CONTROL VALVE	5
1	3-10	REVERSING LEVER STAND	6
1	3-11	REVERSING LEVER	6
1	3-12	REVERSING LEVER SPRING	1
1	3-13	REACH ROD	1
1	4-01	BOILER SHELL	9
1	4-02	BOILER FLUE PIPE-TYPE-1	1
2	4-03	BOILER FLUE PIPE-TYPE-2	1
1	4-04	BOILER BUSH-TYPE-1	1
3	4-05	BOILER BUSH-TYPE-2	1
1	4-06	STAY-BLOWER PIPE	4
1	4-07	WATER-PRESSURE GAUGE TOP FITTING	5
1	4-08	WATER GAUGE BOTTON FITTING	2
1	4-09	SAFETY VALVE	6
1	4-10	SAFETY VALVE DOME	1
1	4-11	WATER GAUGE	9
4	4-12	WATER GAUGE PIPE NUT	1
1	4-13	FIRE BOX	1
1	4-14	DRY BACKHEAD	3
1	4-15	CLACK VALVE	3
1	4-16	REGULATOR VALVE	6
1	4-17	BLOWER VALVE	6
1	4-18	BLOWER VALVE PIPING	2
1	4-19	BACKHEAD FIRE DOOR	3
1	4-20	STEAM SUPPLY PIPE	1
1	4-21	STEAM SUPPLY MANIFOLD	3
1	4-22	BLOWER EXTENTION PIPE	1
1	4-23	PRESSURE GAUGE	5
1	5-01	SADDLE TANK SHELL	18
1	5-02	SADDLE TANK FILLER CAP	3
1	5-03	SADDLE TANK BALANCING PIPE	3
2	5-04	SADDLE TANK STOP NUT	1
1	5-05	DRIVERS CAB SIDE FRAME	3
1	5-06	DRIVERS CAB BUNKER	1
1	5-07	DRIVERS CAB FRONT PLATE	1
1	5-08	DRIVERS CAB REAR FRAME	2
1	5-09	DRIVERS CAB ROOF	1
1	BRAZIL-89mm	RAIL	2
1	6-01	FOCUS	5
1	6-02	WHISTLE	8

Tabla 1. Subconjuntos del modelo

Cabe destacar que, los dos últimos subconjuntos, *focus* (foco) y *whistle* (silbato), no vienen en los planos del modelo [1]. Se han diseñado desde cero para cumplimentar la locomotora y acercar el prototipo digital a la realidad lo máximo posible. El diseño de los mismos, tal y como se comentará en el capítulo del modelado, se

ha llevado a cabo mediante la análisis de imágenes reales de la locomotora de estudio, respetando en todo momento los sistemas de fijación del modelo, es decir, no se ha requerido modificar ninguna perforación, ni aumentar o disminuir la cantidad de las mismas.

En la siguiente tabla, se muestra los recuentos totales. En la primera columna se encuentra el recuento de la cantidad de subconjuntos que componen la locomotora, y en la segunda el recuento de la cantidad de piezas.

TOTAL QTY	TOTAL PCS
100	388

Tabla 2. Recuentos

Por otro lado, han sido necesario elementos de unión para ensamblarlos. Dichos elementos (tornillos, tuercas y pines) se han escogido de la librería de CATIA teniendo en cuenta las especificaciones de cada perforación. Sumando los sistemas de unión, la cifra asciende hasta las 806 piezas.

A continuación, cada subconjunto característico encuentra su representación en un apartado específico. Dentro de estos apartados, se desglosan las piezas individuales que las conforman, destacando aquellas de mayor relevancia o complejidad en su diseño y función, ya que la mayoría de las piezas se caracterizan por su fabricación simple y directa. Este rasgo es resultado de la ingeniería eficiente y funcional que define a estas máquinas. La simplicidad en la fabricación se deriva del hecho de que muchas de estas piezas cumplen funciones esenciales, pero relativamente básicas dentro de cada subconjunto de la máquina.

Además, la naturaleza histórica de las máquinas de vapor, que emergieron en una época en la que la fabricación industrial aún estaba en desarrollo, influyó en la concepción y diseño de estas piezas. Los materiales disponibles y las técnicas de fabricación de la época requerían soluciones simples y fácilmente replicables.

Es importante destacar que, este enfoque selectivo se ha implementado para evitar extender el documento de manera innecesaria. Dado que el proceso de modelado de piezas sigue un método común y homogéneo en la mayoría de los casos, centrarnos en explicar los procesos más importantes o complejos nos permite ofrecer una comprensión clara y concisa del proceso de fabricación de estas piezas.

4.1 BRAZIL-1-01-UNDER FRAME

El "*under frame*" es el marco inferior de la locomotora de vapor. Sostiene todo el peso de la locomotora y proporciona la base sobre la cual se montan los demás componentes, como la caldera, los cilindros, el sistema de suspensión y las ruedas motrices.

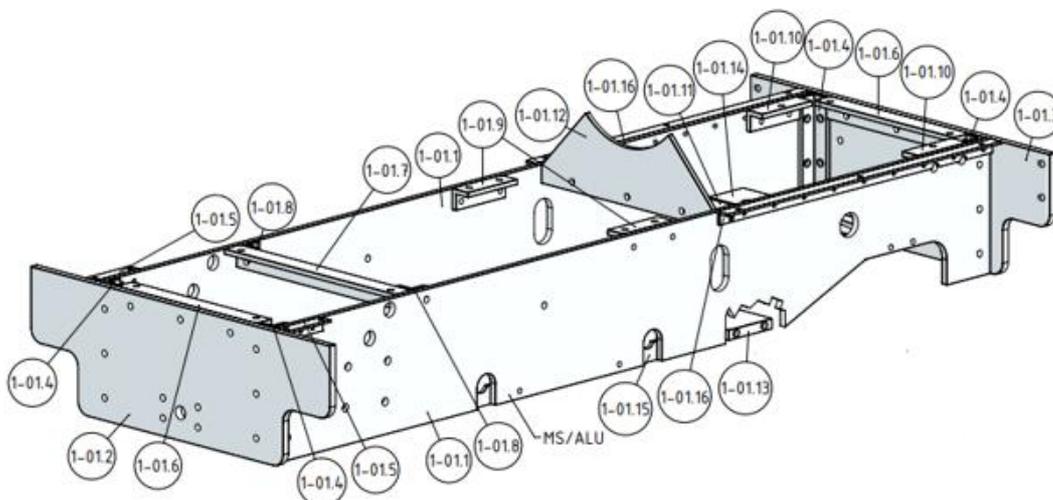


Figura 18. Esquema general de los componentes del *Under Frame* [1]

1-01.9

Se corresponde con una escuadra de unión, usada para unir dos piezas de la estructura mediante uniones atornilladas. El proceso de fabricación ha sido el siguiente:

1. Dibujar el boceto. El formato de identificación se basa en las medidas de la misma. En este caso, por ejemplo, se identifica la pieza con “16x16x4”, siendo los dos primeros números las longitudes del ala vertical y horizontal, respectivamente, y el tercero el grosor de la escuadra.
2. Extruir el boceto hasta la longitud de la escuadra indicada con la herramienta “Pad”.
3. Añadir las perforaciones. Para ello, se crean los *Sketchs* necesarios en cada ala, basados en circunferencias del diámetro correspondiente a la perforación. Finalmente se usa la herramienta “Pocket” para retirar el material correspondiente.

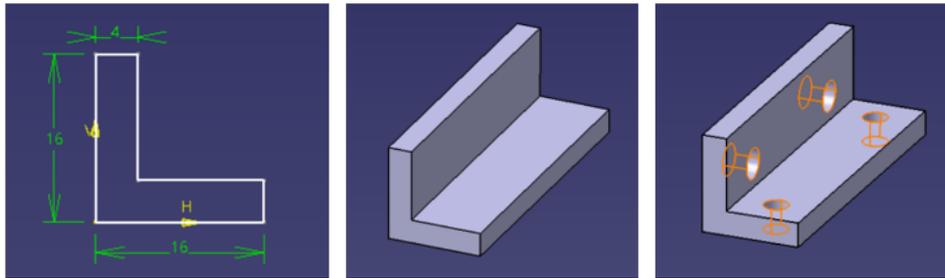


Figura 21. Proceso de modelado de una escuadra

Se debe destacar que la mayoría de las piezas del *Under Frame* se unen con piezas como esta, tal y como se puede observar en el esquema, siendo inapropiado explicar el mismo proceso para cada una de ellas.

1-01.16

Esta pieza también es una escuadra, pero el proceso utilizado para el modelado ha sido diferente, por lo que se procede a su explicación.

1. Dibujar el boceto del perfil longitudinal de una de las alas.
2. Extruir dicho boceto con la herramienta “Pad”.
3. En una de las superficies generadas al extruir el elemento, realizar un nuevo *sketch* con el perfil longitudinal del otro ala.
4. Extruir el nuevo *sketch*.

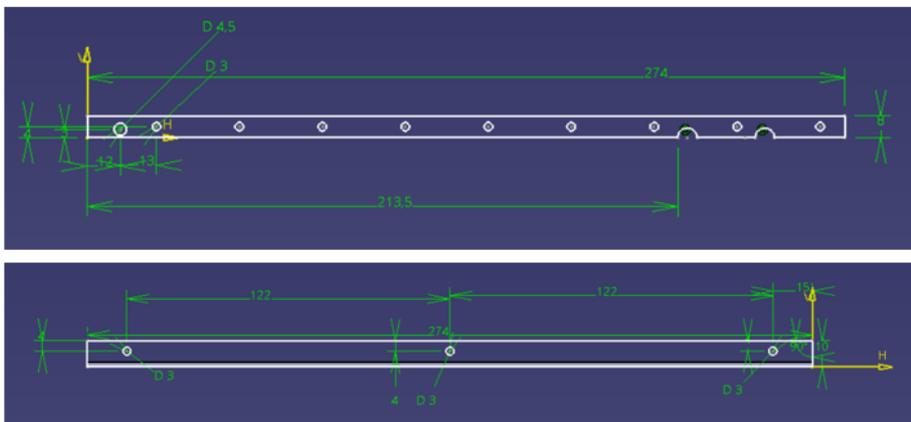


Figura 22. Proceso de modelado de la pieza 1-01.16

Con este método no es necesario emplear la herramienta “Pocket” para realizar las perforaciones, ya que se obtienen al incluirlas en el propio boceto previo a la extrusión.

1-01.12

Esta pieza se utiliza como uno de los apoyos principales del depósito de agua de la caldera. El proceso de modelado es similar a las piezas anteriores.

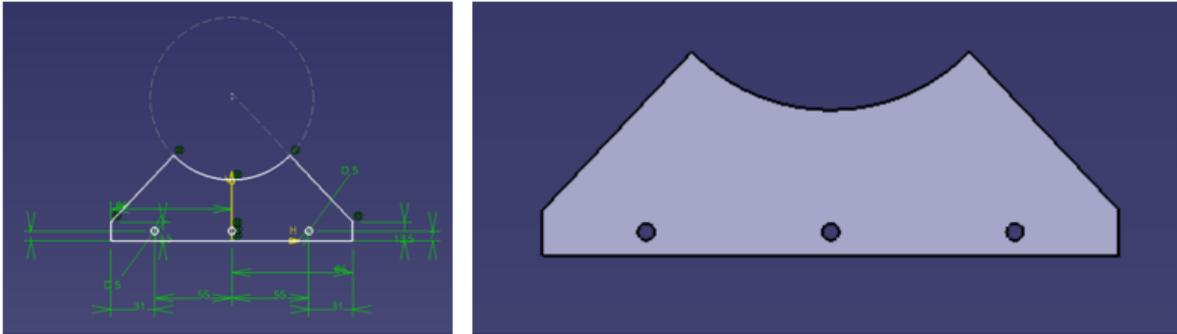


Figura 23 Proceso de modelado de la pieza 1-01.12

Finalmente, se muestra el conjunto completo modelado correspondiente a esta sección.

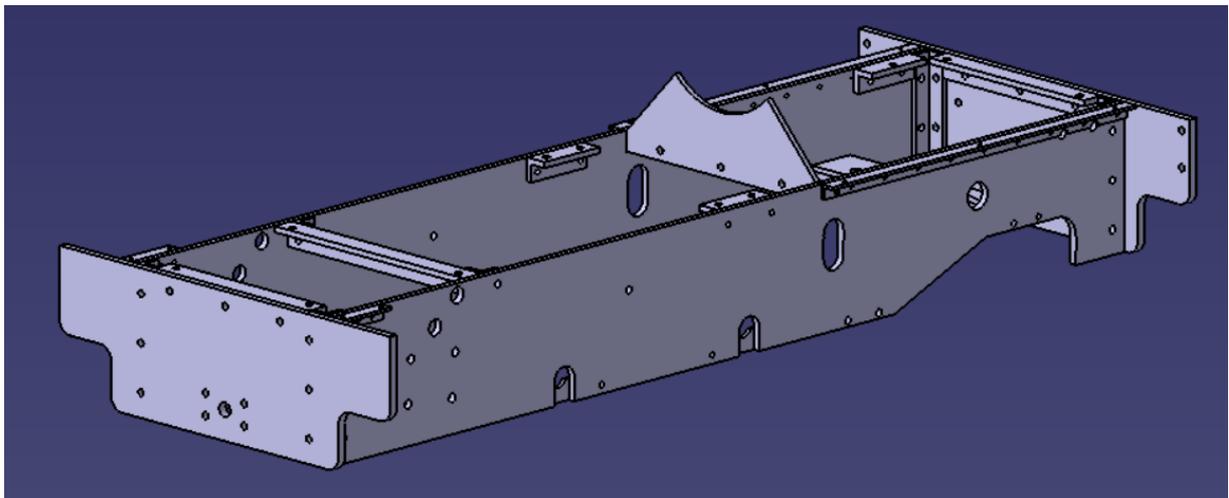


Figura 24. *Under Frame* modelado en Catia V5

En cuanto al material, debe ser un componente resistente por lo que se ha decidido implementar acero (*steel*) como material principal para esta parte. Para ello, se ha hecho uso de la herramienta “*Apply Material*” que permite escoger entre los diferentes materiales de la biblioteca de CATIA.

4.2 BRAZIL-1-02-WHEEL AXLE BEARING

El "*wheel axle bearing*" se refiere al cojinete del eje de las ruedas de la locomotora de vapor. Este componente es esencial para el funcionamiento suave y eficiente de la locomotora. Su función principal es proporcionar un punto de apoyo y rotación para el eje de las ruedas, permitiendo que estas giren con facilidad sobre el rail. Un mal funcionamiento o un desgaste excesivo de estos cojinetes pueden causar problemas graves, como descarrilamientos o fallos en la transmisión de fuerza.

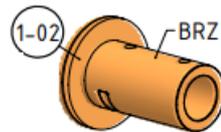


Figura 25. Esquema general de los componentes del *Wheel Axle Bearing* [1]

El proceso de modelado es el siguiente:

1. En un plano, implementar un *sketch* y realizar el boceto de la corona base.
2. Con la herramienta *Pad*, extruir dicho boceto la distancia necesaria, según sea el espesor de la misma.
3. Usar una de las superficies generadas como nuevo plano y realizar el boceto de otra corona, la cual se corresponde con la sección del cilindro que soportará el eje.
4. Extruir el nuevo boceto.
5. Realizar nuevos bocetos en planos perpendiculares y con la herramienta *Pocket* extraer el material, creando así las perforaciones y la ranura requerida.
6. Con *Apply Material*, establecer el bronce como el material principal.

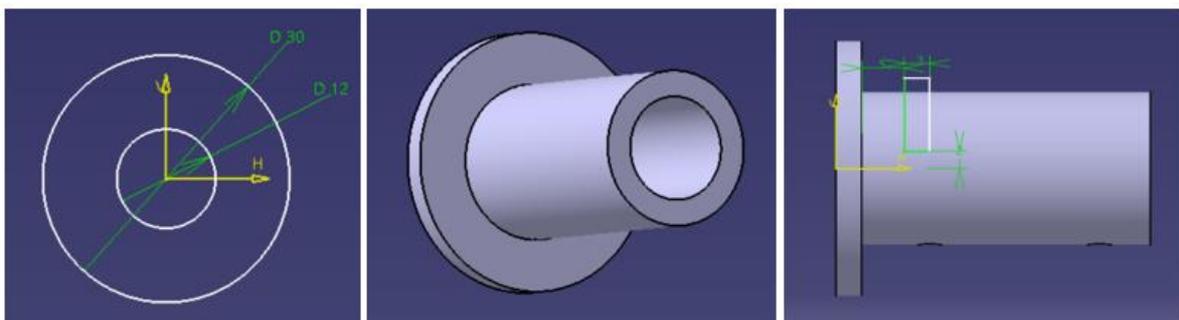


Figura 26. Proceso de modelado del *Wheel Axle Bearing*

4.3 BRAZIL-1-03-CYLINDER:

El "*cylinder*" es el cilindro de la locomotora de vapor. En él, el vapor se expande y empuja un pistón, convirtiendo la energía térmica en movimiento lineal. Este movimiento se transforma luego en movimiento rotativo, impulsando las ruedas motrices de la locomotora. Los cilindros suelen estar hechos de acero forjado debido a su resistencia a las altas presiones y temperaturas del vapor, así como a su durabilidad bajo las condiciones de operación exigentes de una locomotora de vapor.

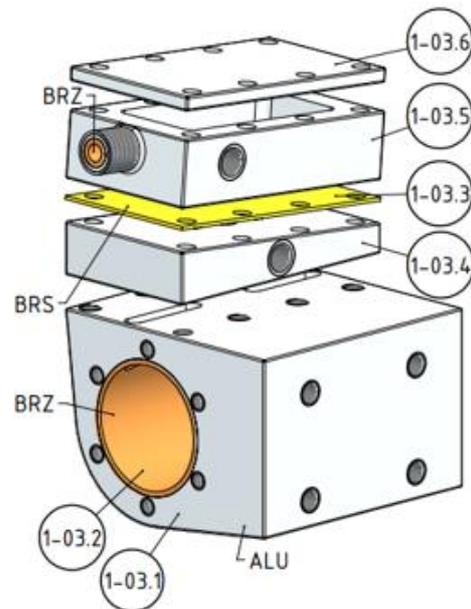


Figura 27. Esquema de los componentes del *Cylinder* [1]

1-03.1

Esta pieza es el cilindro propiamente dicho, por lo que en su interior se ejecutará el desplazamiento lineal del pistón debido a la diferencia de presiones. La complejidad del modelado de esta pieza radica en la implementación de perforaciones en diversos planos. El proceso es el siguiente:

1. Sobre un plano del espacio, realizar el boceto con las medidas correspondientes.
2. Extruir el boceto con *Pad*.
3. Seleccionar el plano que estará en contacto con el *Under Frame* y realizar el boceto de las 4 perforaciones que lo unirán a la estructura.
4. Realizar las perforaciones con *Pocket*.
5. Realizar los pasos 3 y 4 en las diferentes caras del bloque para crear las perforaciones necesarias para unir el resto de piezas.

Cabe destacar que las perforaciones superiores, diseñadas para unir las piezas que contendrán la válvula deslizante, son inclinadas. Para realizar estas, se ha llevado a cabo el siguiente proceso.

- i. Incluir un boceto con una línea inclinada 5° , para utilizarla como línea guía en el proceso de extracción de material.
- ii. Incluir un plano con la herramienta *Plane* en el extremo de la línea, perpendicular a la misma.
- iii. Quitar el material con *Pocket*, indicando como dirección de avance la de la línea creada y como límite el plano de su extremo.

De esta manera, se crean las perforaciones inclinadas con el ángulo necesario disminuyendo su profundidad a lo largo del bloque principal, tal y como se puede observar en la Figura 28.

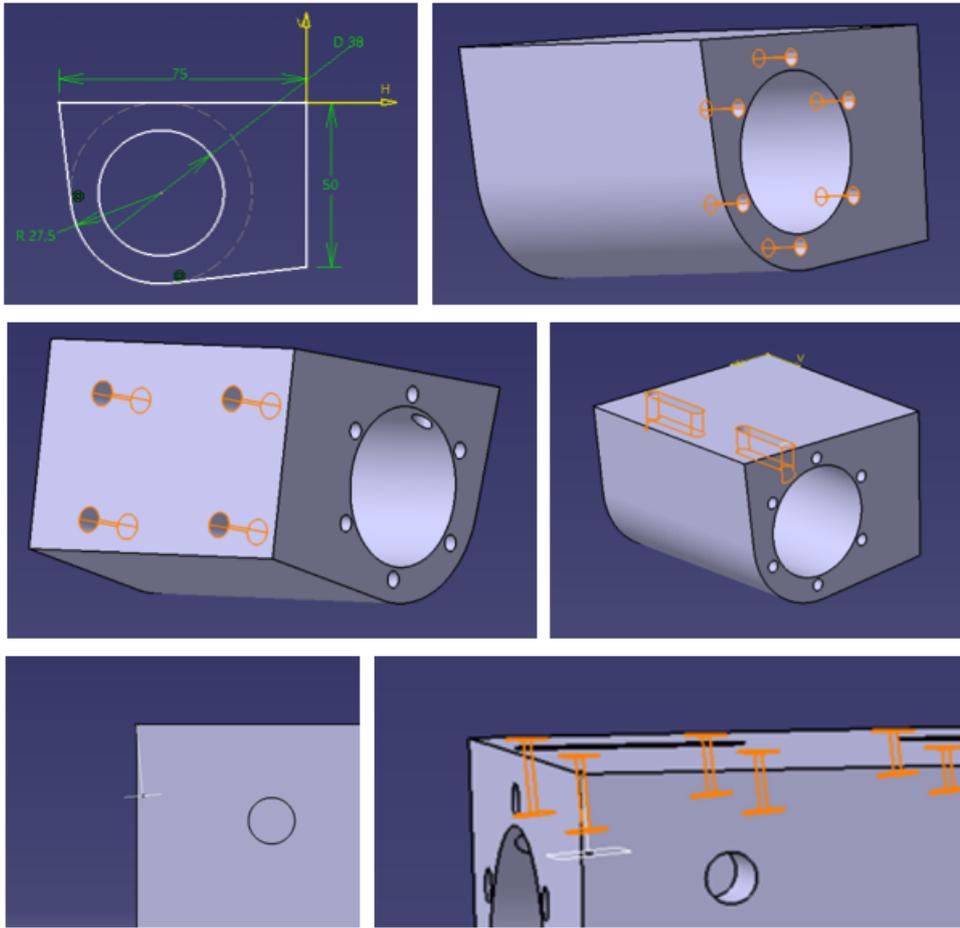


Figura 28. Proceso de modelado de la pieza 1-03.1

1-03.4

La función de esta pieza es unir el bloque del cilindro con el bloque que contiene la válvula de corredera. Al igual que la pieza anterior, esta también dispone de perforaciones inclinadas, pero el método de modelado de las mismas no ha sido tan elaborado.

1. Dibujar el boceto del perfil de la pieza en un plano.
2. Extruir el boceto con *Pad*.
3. Añadir un nuevo boceto en la cara superior de la pieza que simule la disposición de las perforaciones y el tamaño de las mismas.
4. Extraer el material para crear las perforaciones con la herramienta *Pocket*. La propia disposición de la cara superior de la pieza, provoca que las perforaciones se realicen con los 5° de inclinación necesarios.

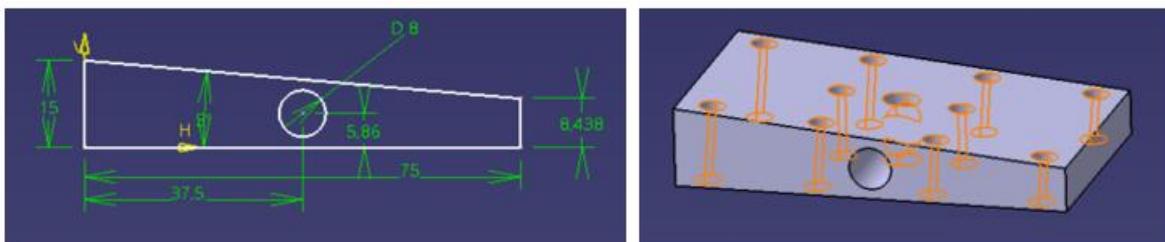


Figura 29. Proceso de modelado de la pieza 1-03.4

A continuación, se muestra el bloque del cilindro modelado y ensamblado:

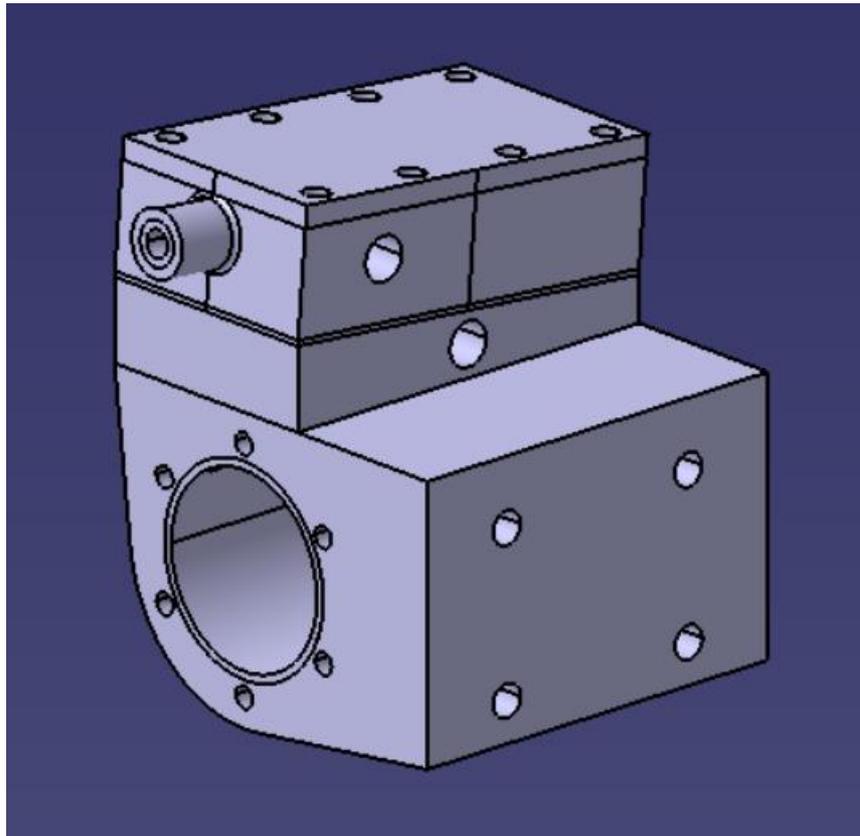


Figura 30. Cylinder modelado en Catia V5

4.4 BRAZIL-1-04-SLIDE VALVE SPINDLE GLAND NUT

El "*slide valve spindle gland nut*" es una tuerca que asegura el sellado alrededor del husillo de la válvula deslizante en el sistema de distribución de vapor de una locomotora de vapor. Suele estar hecha de acero o latón para resistir las altas temperaturas y presiones del fluido. Su función es crucial para evitar fugas y garantizar un funcionamiento eficiente del sistema de vapor de la locomotora.

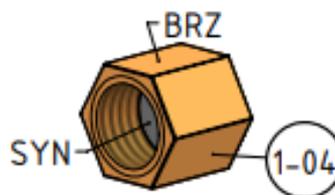


Figura 31. Esquema de la *slide valve spindle gland nut* [1]

El proceso de modelado ha sido el siguiente:

1. Sobre un plano, dibujar el boceto de un hexágono con las medidas necesarias.
2. Con *Pad*, extruir el boceto para formar un bloque hexagonal.
3. En las caras hexagonales de la piezas, realizar los bocetos de las perforaciones características de la

pieza mediante circunferencias.

4. Extraer el material hasta la distancia indicada en los planos con *Pocket*.

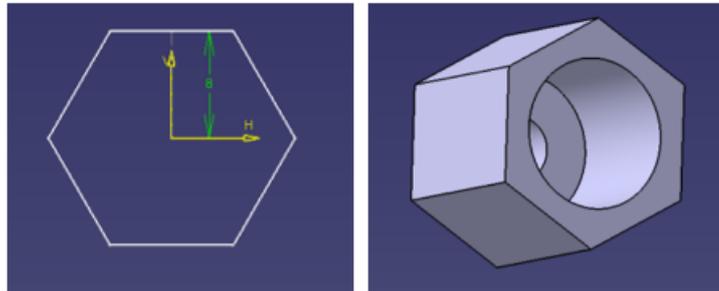


Figura 32. Proceso de modelado de la *slide valve spindle gland nut*

El modelo de la máquina de vapor emplea numerosas tuercas similares, cambiando las dimensiones de las mismas. El proceso de modelación de todas ellas ha sido siempre el comentado en este apartado.

4.5 BRAZIL-1-05-CYLINDER FRONT COVER

La "*cylinder front cover*" es la cubierta frontal del cilindro. Su función principal es sellar y proteger la parte delantera del cilindro, donde se encuentra el pistón y donde se produce la acción de expansión del vapor. Esta cubierta está diseñada para soportar las altas temperaturas y presiones, mientras proporciona acceso para el mantenimiento y la inspección del cilindro y el pistón. Generalmente, está fabricada en acero para garantizar su resistencia y durabilidad en condiciones de operación exigentes.

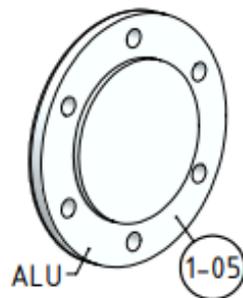


Figura 33. Esquema de la *cylinder front cover* [1]

El proceso de modelado ha sido el siguiente:

1. Sobre un plano, dibujar el boceto de una circunferencia que contiene otras 6, correspondiéndose estas con las perforaciones de la cubierta.
2. Extruir el boceto con *Pad* indicando el grosor de la misma.
3. Sobre una de las caras, añadir un boceto con una nueva circunferencia.
4. De nuevo, extruir el boceto a la medida necesaria.
5. Con *Fillet*, redondear el borde exterior de la cubierta.

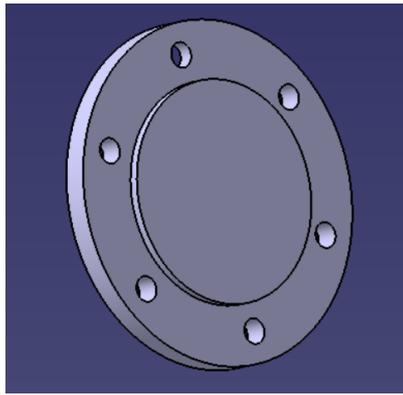


Figura 34. Cylinder front cover modelada en CATIA V5

4.6 BRAZIL-1-06-CYLINDER REAR COVER

La "*cylinder rear cover*" es la cubierta trasera del cilindro. Esta pieza tiene la función de sellar y proteger la parte posterior del mismo, donde se encuentra el extremo opuesto al pistón. Al igual que la cubierta frontal, la cubierta trasera está diseñada para soportar las altas temperaturas y presiones del vapor. Además, proporciona acceso para el mantenimiento y la inspección del cilindro. Por lo general, está fabricada en hierro fundido o acero para garantizar su resistencia y durabilidad en condiciones de operación exigentes.

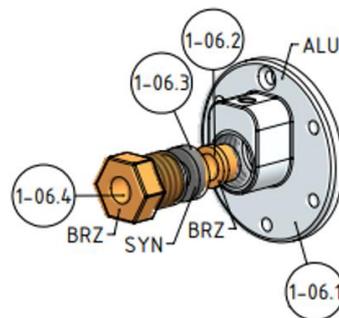


Figura 35. Esquema de los componentes de la *cylinder rear cover* [1]

1-06.1

El proceso de modelado es exactamente igual que en el caso de la *cylinder front cover*, añadiendo además lo expuesto a continuación:

1. En este caso, se realiza la perforación superior con la herramienta *Hole*, añadiendo el avellanado correspondiente.
2. En la cara frontal de la pieza, realizar un nuevo boceto para añadir el saliente semicircular que se puede observar en la Figura 36. Este boceto se basa en un semicírculo y un cuadrado unidos, por lo que el diámetro del semicírculo debe ser igual a la longitud del lado del cuadrado.
3. Extruir con *Pad* este último boceto.
4. Añadir las perforaciones necesarias mediante el proceso basado en realizar bocetos de circunferencias sobre las superficies perforadas y extraer el material con *Pocket*.

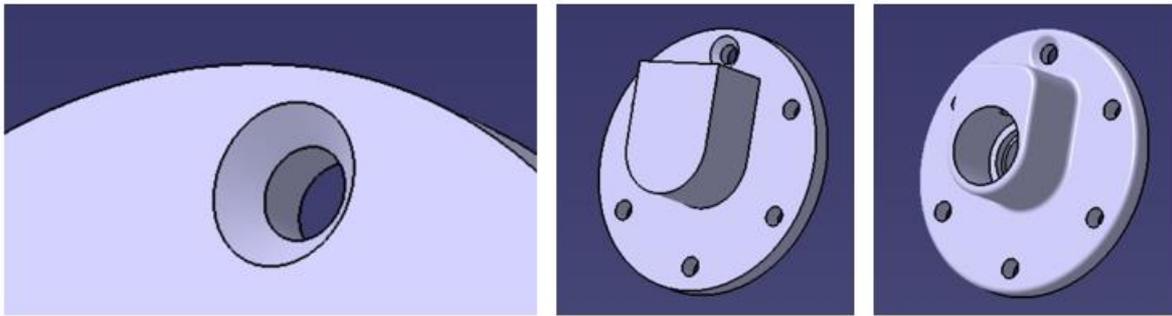


Figura 36. Proceso de modelado de la pieza 1-06.1

Finalmente, se muestra la *cylinder rear cover* modelada al completo:

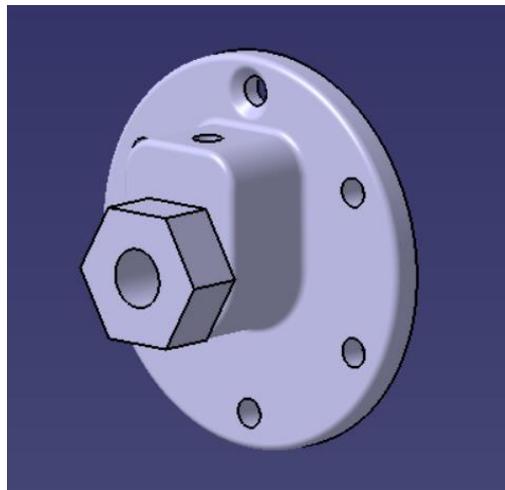


Figura 37. *Cylinder rear cover* modelada en CATIA V5

4.7 BRAZIL-1-07-STEAM INLET TEE+PIPES

El conjunto "*steam inlet tee + pipes*" es parte del sistema de distribución de vapor. Consiste en una conexión en forma de T (*tee*) y los conductos (*pipes*) que dirigen el vapor desde la caldera hacia los cilindros. Esta configuración es crucial para transferir la energía del vapor a los pistones y generar movimiento en la locomotora. Por lo general, estas piezas están fabricadas con acero para resistir el calor y la presión del vapor, aunque para el modelo del presente proyecto se usa latón.

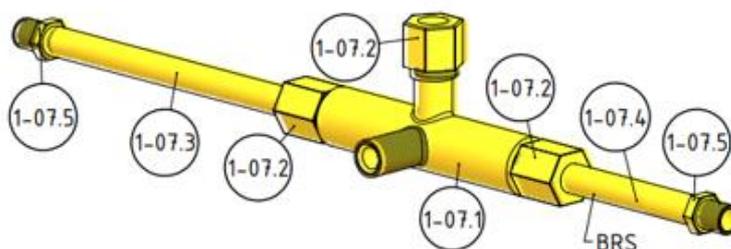


Figura 38. Esquema de los componentes de la *Steam inlet tee + pipes* [1]

1-07.1

Esta pieza es la ya nombrada T (*tee*). Sirve para distribuir el vapor procedente de los conductos de la caldera hacia los cilindros y hacia el lubricador de la locomotora.

El proceso de modelado es el siguiente:

1. Realizar en un plano un *sketch* el boceto de una corona circular, lo que servirá para construir el cuerpo base de la pieza.
2. Extruir el boceto anterior con *Pad*.
3. En cada una de las caras circulares de tubo generado, realizar un boceto similar al primero pero con las medidas reducidas para crear la superficie donde se situarían las roscas macho en el modelo real.
4. Extruir ambos bocetos.
5. De manera similar, crear los tubos de entrada de vapor y de salida en planos perpendiculares al plano escogido inicialmente.

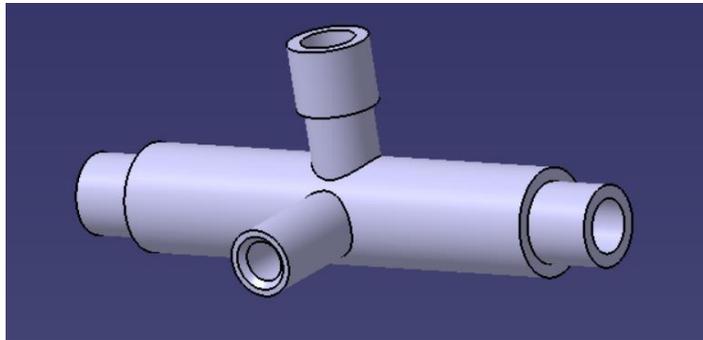


Figura 39. Pieza 1-07.1 modelada

A continuación, se muestra el *steam inlet tee + pipes* modelado al completo:

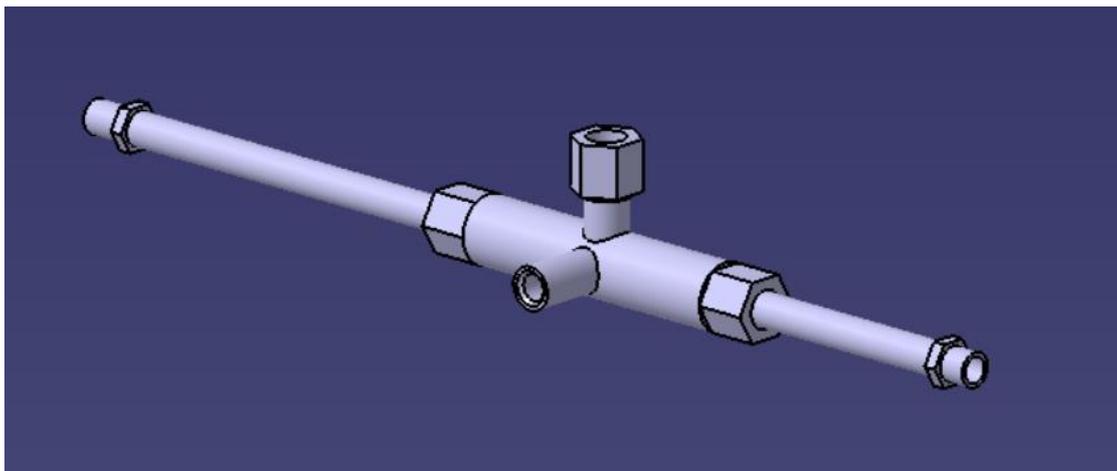


Figura 40. *Steam inlet tee + pipes* modelado en CATIA V5

4.8 BRAZIL-1-08-STEAM EXHAUST TEE+PIPES

El conjunto "*steam exhaust tee + pipes*" forma parte del sistema de escape de vapor en una locomotora de vapor. Incluye una conexión en forma de T (*tee*) y conductos (*pipes*) que permiten que el vapor ya usado en

los cilindros se expulse fuera de la locomotora. Estas piezas son cruciales para un funcionamiento eficiente de la locomotora, garantizando la liberación controlada del vapor usado. Por lo general, están fabricadas con materiales resistentes al calor y la corrosión, por lo que en este proyecto se ha utilizado latón y bronce, siendo este último el material característico de la mayoría de las tuberías del modelo.

El proceso de modelado es semejante al del sistema *steam inlet tee + pipes*.

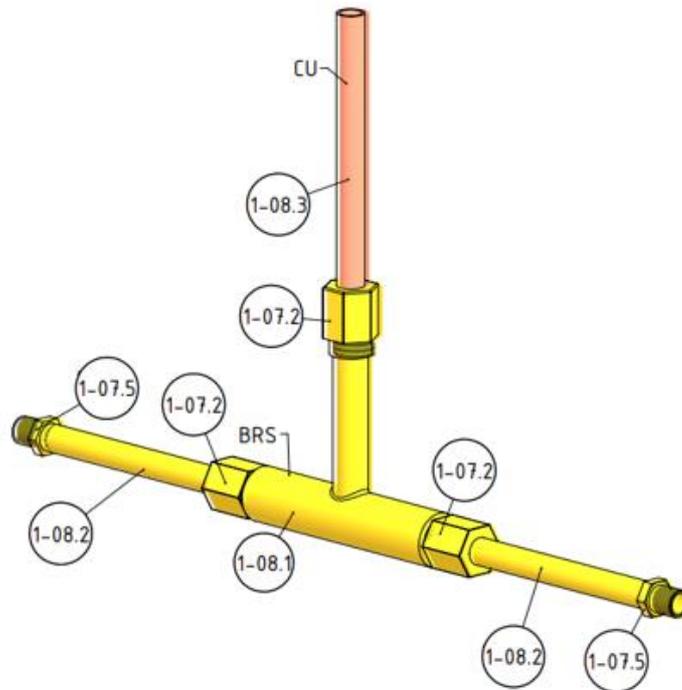


Figura 41. Esquema de los componentes de *steam exhaust tee + pipes* [1]

A continuación, se muestra dicho sistema modelado:

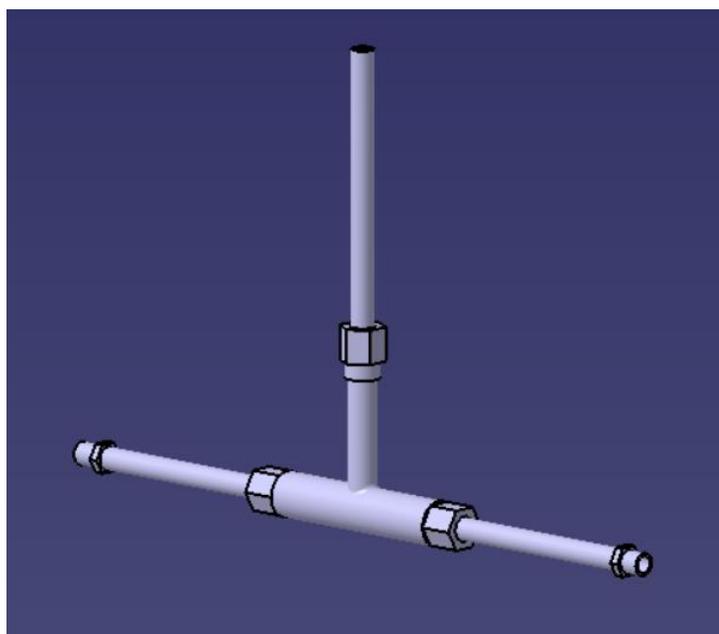


Figura 42. *Steam exhaust tee + pipes* modelado en CATIA V5

4.9 BRAZIL-1-09-CROSSHEAD GUIDE BAR

La "*crosshead guide bar*" es una barra que guía el movimiento del pistón en una locomotora de vapor, convirtiendo el movimiento lineal en rotativo. Está hecha de acero o hierro fundido y es crucial para un funcionamiento eficiente de la locomotora.

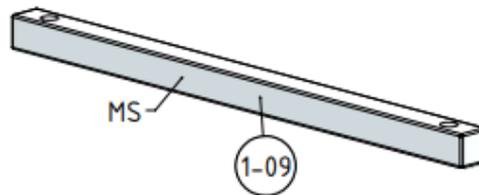


Figura 43. Esquema de la *crosshead guide bar* [1]

El proceso de modelado es el siguiente:

1. Se define un boceto 2D, representando la sección transversal de la barra. Para ello, se dibuja un cuadrado aplicando restricciones dimensionales para fijar las medidas exactas de la sección.
2. Con el boceto de la sección cuadrada listo, se utiliza la herramienta *Pad* para extruir el perfil a lo largo de la longitud de la barra.
3. Para redondear los bordes de la barra, se seleccionan los cuatro bordes longitudinales de la extrusión y se aplica la herramienta *Fillet*.
4. A continuación, se crean los agujeros en los extremos de la barra. Para ello, se selecciona uno de los planos longitudinales y se dibujan dos círculos en el boceto, uno en cada extremo, utilizando la herramienta *Circle*.
5. Después, con las posiciones de los círculos definidas, se usa la herramienta *Pocket* para perforar los agujeros a través de la barra. La profundidad del corte se establece para atravesar completamente la sección.

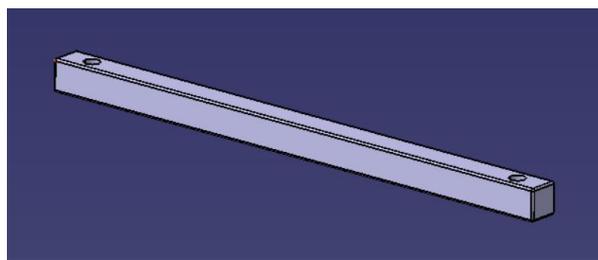


Figura 44. *Crosshead guide bar* modelado en CATIA V5

4.10 BRAZIL-1-10-CROSSHEAD GUIDE BAR BRACKET

El "*crosshead guide bar bracket*" es un soporte que asegura la *crosshead guide bar* al chasis de la locomotora. Está hecho de acero o hierro fundido y es crucial para garantizar un movimiento suave y preciso del pistón.

El proceso de modelado ha sido el siguiente:

1. Se comienza creando un boceto que define la base de la placa, la cual tiene forma rectangular pero con un cuarto de círculo centrado en una de sus esquinas.

2. Después de completar el boceto, se realiza una extrusión de la placa para darle el espesor correspondiente.
3. Para crear las láminas perpendiculares, se dibujan dos perfiles rectangulares en los planos laterales. Estos perfiles se extruyen para formar las láminas de fijación.
4. Se crean perforaciones en las láminas perpendiculares dibujando círculos en las posiciones indicadas en los planos. Luego, se utiliza la herramienta *Pocket* para perforar los agujeros que atraviesan las láminas, permitiendo la fijación con tornillos o pernos.

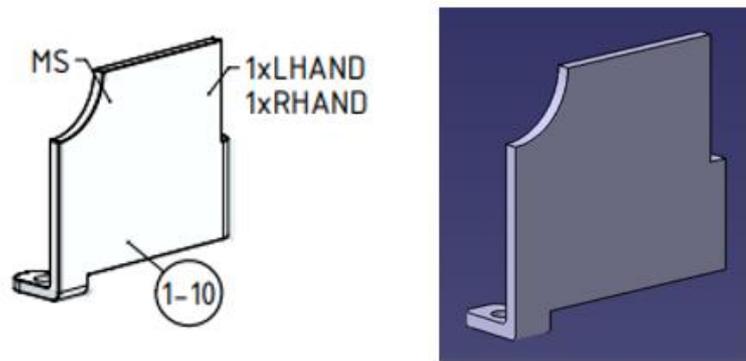


Figura 45. Esquema [1] y modelado en CATIA V5 de la *crosshead guide bar bracket*

4.11 BRAZIL-1-11-LUBRICATOR

El "*lubricator*" es un dispositivo en locomotoras de vapor que suministra lubricante a partes móviles para reducir la fricción y el desgaste, manteniendo así un funcionamiento suave y eficiente. Funciona aprovechando la presión del vapor, que lleva pequeñas cantidades de lubricante a las partes móviles a través de tuberías y válvulas.

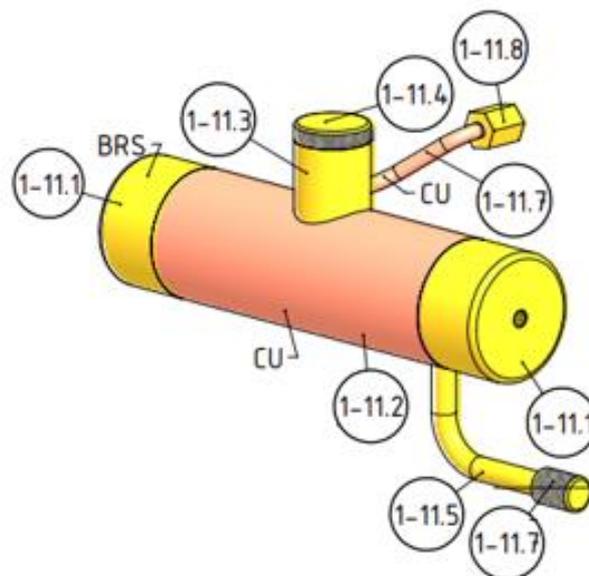


Figura 46. Esquema del *Lubricator* [1]

1-11.7

Esta pieza se corresponde con el conducto que lleva el vapor desde las tuberías de distribución hasta el lubricador. El proceso de modelado es el siguiente:

1. Se inicia dibujando un boceto que representa el perfil de la tubería en forma de "S". Este boceto se realiza utilizando la herramienta *Line* y *Arc* para definir la forma curva de la "S", aplicando restricciones para asegurar que la forma se ajuste a las dimensiones y ángulos necesarios.
2. A continuación, en un plano perpendicular a la sección anterior, se dibuja la sección 2D de la tubería circular.
3. Con el perfil 2D definido, se aplica la herramienta *Rib* seleccionando la sección y el perfil, generando una forma tubular a lo largo de la trayectoria definida por el perfil, creando así la tubería en forma de "S".
4. Para garantizar el sellado de la unión en uno de los extremos de la tubería, se crea un reborde adicional. Se comienza dibujando un boceto en el extremo de la tubería donde se desea el reborde. Este boceto incluye un perfil de reborde. Se utiliza la herramienta *Shaft* para girar el perfil del reborde alrededor del eje de la tubería, formando así el reborde. Este reborde asegura una mejor unión y sellado en la conexión.

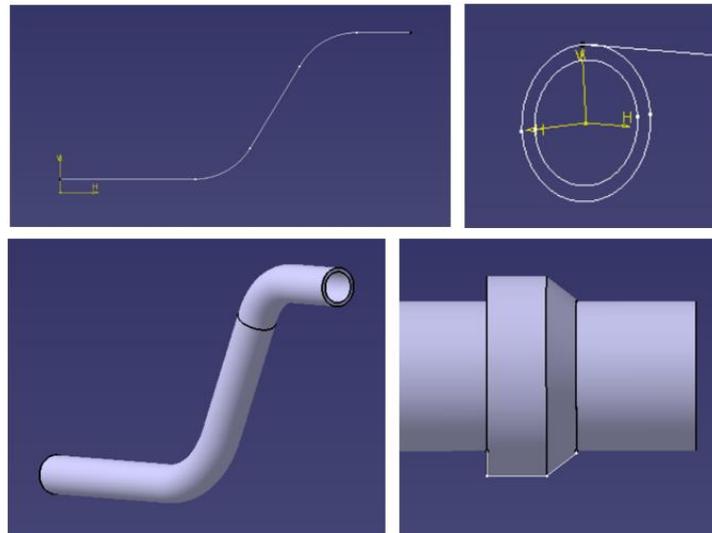


Figura 47. Proceso de modelado de la pieza 1-11.7 en CATIA V5

Finalmente, se muestra el suministrador de lubricante modelado al completo y ensamblado:

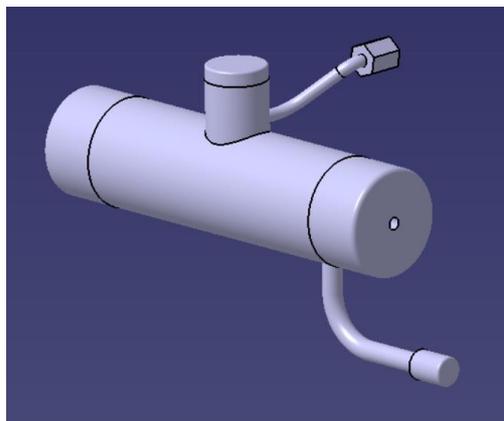


Figura 48. *Lubricator* modelado en CATIA V5

4.12 BRAZIL-1-12-SUMP+BURNER

El "*sump + burner*" es un conjunto utilizado en locomotoras de vapor para calentar agua y generar vapor. El *burner* quema combustible, como carbón o aceite, para calentar el agua en el *sump* y producir vapor. Este vapor se utiliza luego para impulsar los cilindros y las ruedas de la locomotora.

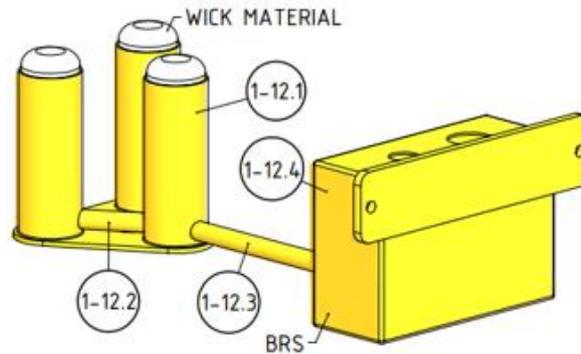


Figura 49. Esquema del *sump + burner* [1]

1-12.1

Consiste en tres recipientes tubulares dispuestos verticalmente, diseñados para contener material inflamable. El proceso de modelado es semejante a piezas vistas anteriormente:

1. Sobre un plano, dibujar la forma de la placa base. Esta se puede asemejar a un triángulo con los vértices redondeados y una circunferencia en el centro.
2. Seguidamente se extruye el boceto dándole el grosor correspondiente a la base.
3. Sobre la cara superior de la base, se realiza el boceto de la base de los tres depósitos según las medidas indicadas en los planos.
4. De igual manera, se extruye dicho boceto hasta la altura indicada.
5. Finalmente, se realizan las perforaciones para poder conectar los tubos por los que fluye el aceite. Para ello, se coloca un punto de referencia entre los dos depósitos sobre los que se quiere realizar la perforación y, usando este punto de referencia, se crea un plano tangente a la superficie de ambos depósitos con la herramienta *Plane*. A continuación, se realizan los bocetos de las perforaciones correspondientes sobre dichos planos y posteriormente se emplea la herramienta *Pocket* para extraer el material, extendiendo dicha extracción hasta ambos depósitos.

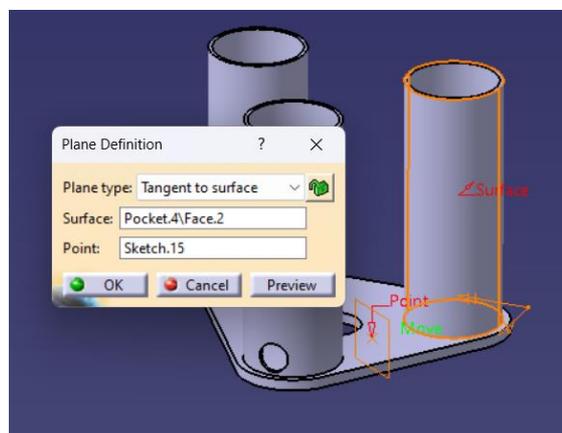


Figura 50. Creación de plano tangente para realizar las perforaciones sobre los depósitos

1-12.4

El *Sump* es un componente rectangular que sirve para almacenar y distribuir lubricante en la locomotora. Está compuesto por una placa de sujeción con perforaciones para su fijación al chasis, y el propio depósito hueco construido sobre la placa.

El proceso de modelado es el siguiente:

1. Se comienza dibujando un boceto en cualquier plano para la placa de sujeción. Este boceto tiene forma rectangular, con las dimensiones necesarias para sujetarlo al chasis.
2. En este boceto, se añaden dos perforaciones usando la herramienta *Circle* en las posiciones adecuadas para la fijación.
3. Después de dibujar el perfil, se utiliza la herramienta *Pad* para extruir la placa y darle el espesor necesario.
4. Sobre una de las caras de la placa de sujeción, se dibuja el boceto que representa el fondo del depósito, con un perfil rectangular centrado en la placa. Este perfil define las dimensiones exteriores del depósito.
5. Se extruye el perfil hasta la anchura del depósito utilizando la herramienta *Pad* para crear un bloque macizo sobre la placa de sujeción.
6. Para hacerlo hueco, se dibuja un segundo boceto en la cara frontal del bloque. Este boceto tiene forma rectangular, pero con dimensiones ligeramente menores que las del perfil exterior, definiendo el grosor de las paredes del depósito.
7. A continuación, se utiliza la herramienta *Pocket* para extraer el material interno del bloque, creando así el espacio hueco del depósito. La profundidad de esta operación se ajusta para no perforar el fondo, dejando un grosor adecuado en las paredes y el fondo del depósito.
8. En las superficies adecuadas del depósito, se dibujan bocetos adicionales para agregar los agujeros necesarios. Estos son para la conexión de tuberías o accesorios.
9. Se utiliza nuevamente la herramienta *Pocket* para realizar las perforaciones en las ubicaciones correctas, definiendo la profundidad requerida para ello.
10. Finalmente, se aplica la herramienta *Fillet* para redondear los bordes externos del depósito. Este paso da un acabado más estético y funcional al depósito.

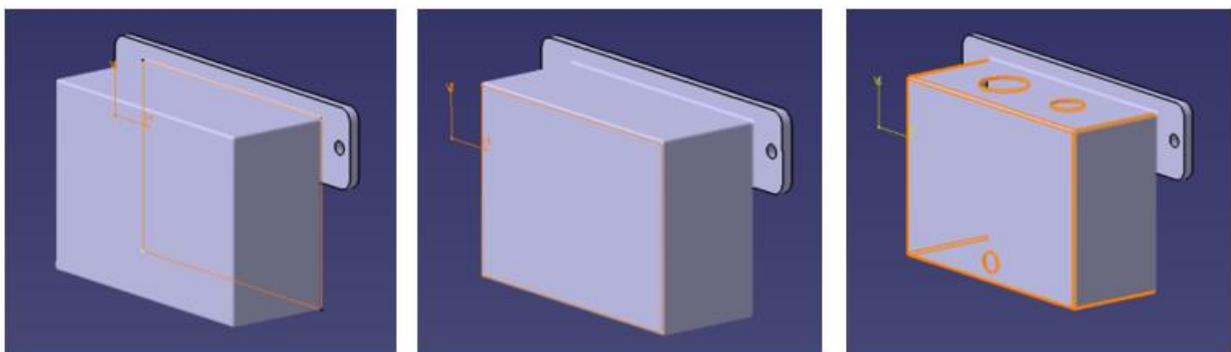


Figura 51. Pceso de modelado del *sump* en CATIA V5

Finalmente, en la Figura 52 se muestra el *sump* + *burner* modelado y ensamblado.

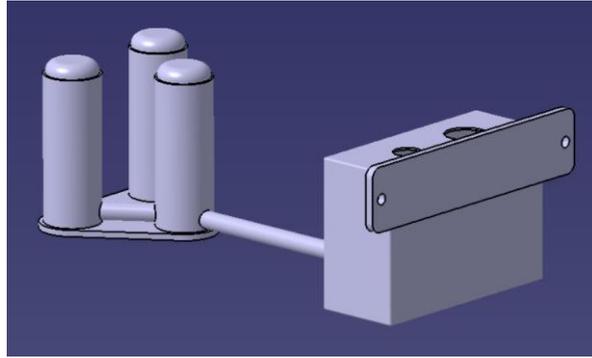


Figura 52. *Sump + burner* modelado y ensamblado en CATIA V5

4.13 BRAZIL-1-13-TRUNNION BLOCK

El "*trunnion block*" es un componente que proporciona soporte y estabilidad a la barra de control de la locomotora. En el contexto del "*expansion link + shaft*", el *trunnion block* sostiene el eje que permite el movimiento de la barra de expansión (*expansion link*). Por lo general, está hecho de acero o hierro fundido para garantizar su resistencia y durabilidad bajo las condiciones exigentes de funcionamiento de la locomotora. Para este proyecto se ha utilizado el acero, tal y como se indica en los planos.

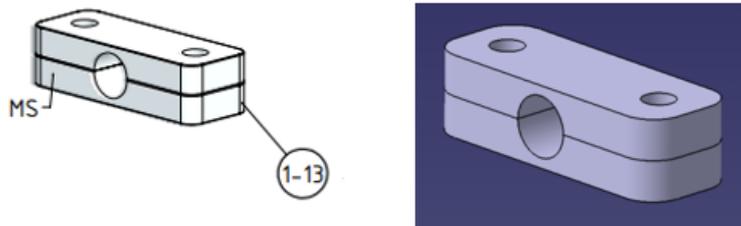


Figura 53. Esquema [1] y modelado en CATIA V5 del *trunnion block*

4.14 BRAZIL-1-14-BUFFER

Los "*buffers*" forman parte del acoplamiento entre vagones y locomotoras. Estos dispositivos absorben la energía cinética durante el enganche de los vagones y proporcionan un amortiguador en caso de colisión o desaceleración brusca. Además, los buffers ayudan a mantener una distancia adecuada entre los vagones cuando están en movimiento y a distribuir las fuerzas de tracción y compresión durante el transporte. Está hecho de materiales resistentes como acero.

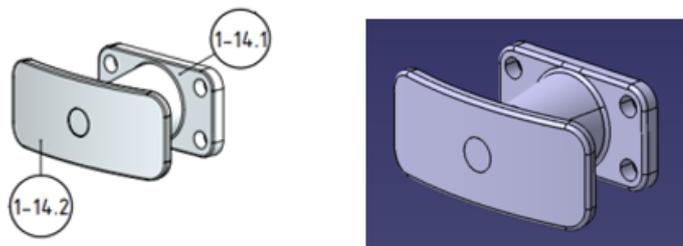


Figura 54. Esquema [1] y modelado en CATIA V5 del *buffer*

4.15 BRAZIL-2-01-FRONT WHEEL SET

El "*front wheel set*" es el conjunto de ruedas ubicado en la parte delantera del bloque motriz de la locomotora. Proporciona soporte y dirección al vehículo sobre los rieles, asegurando un viaje suave y estable. Incluye las ruedas, ejes, cojinetes y otros componentes necesarios para un funcionamiento seguro.

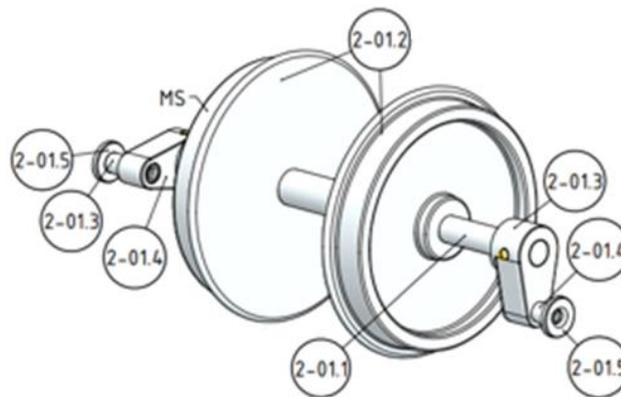


Figura 55. Esquema del *front wheel set* [1]

A continuación se explica el proceso de modelado de las piezas más características que lo componen:

2-01.2

Esta pieza es la rueda propiamente dicha. El proceso de modelado es el siguiente:

1. En cualquier plano, realizar un boceto de la mitad superior de la sección de la misma.
2. Con la herramienta *Shaft* se crea la rueda sólida extruyendo el boceto alrededor del eje de revolución, que en este caso es el horizontal (H).

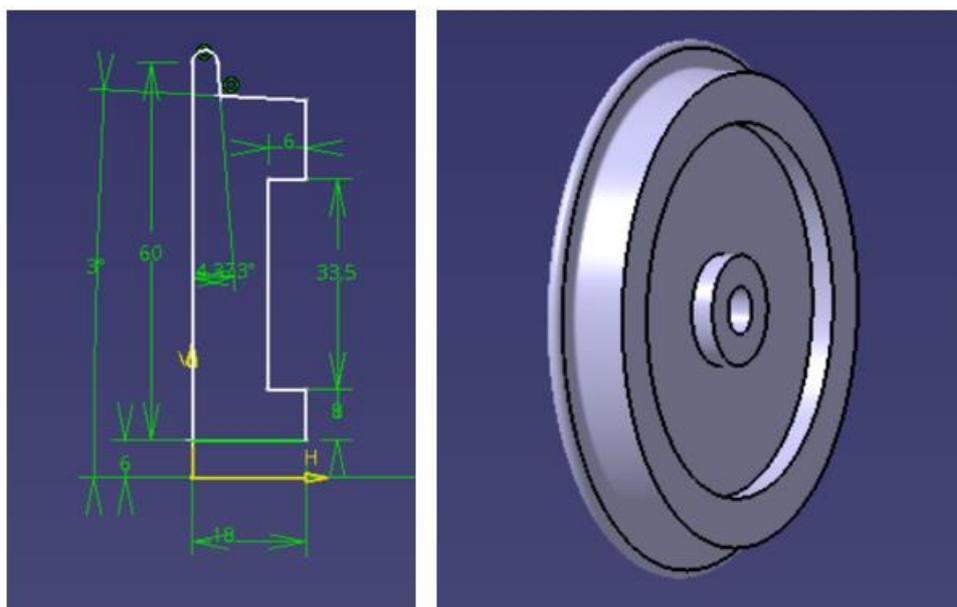


Figura 56. Proceso de modelado de la pieza 2-01.2

El resto de piezas que componen el conjunto *front wheel set* se modelan de manera semejante a otras descritas anteriormente.

A continuación, se muestra el conjunto completo ensamblado:

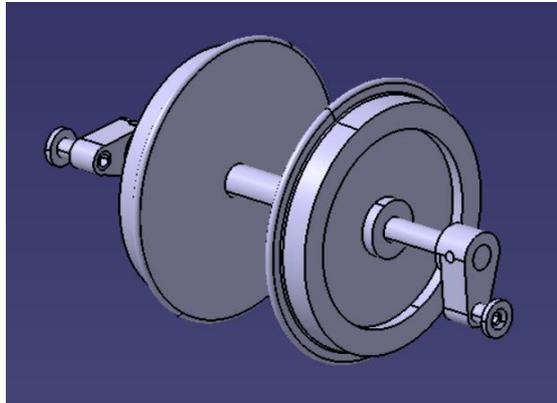


Figura 57. *Front wheel set* modelado en CATIA V5

4.16 BRAZIL-2-02-REAR WHEEL SET

El "*rear wheel set*" es el conjunto de ruedas de la parte trasera del bloque motriz. Proporciona soporte, estabilidad y dirección al vehículo sobre los rieles. Incluye ruedas, ejes, cojinetes y otros elementos esenciales para un funcionamiento seguro y eficiente. El proceso de modelado no varía excesivamente con respecto al conjunto de ruedas delantero.

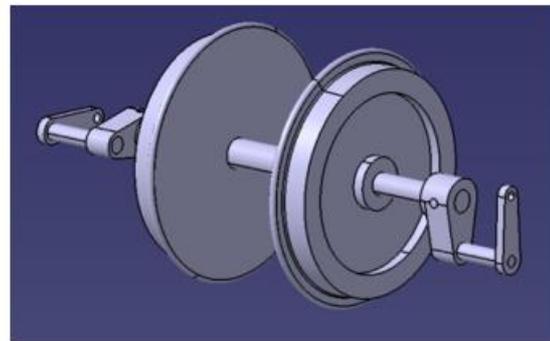
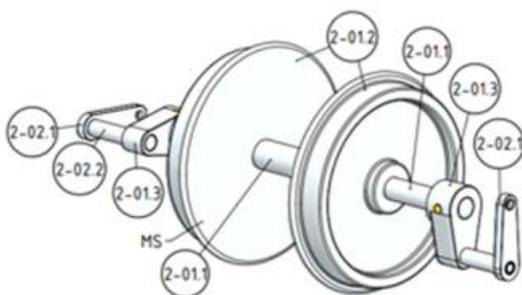


Figura 58. Esquema [1] y modelado en CATIA V5 del *front wheel set*

4.17 BRAZIL-2-03-TRAILING WHEEL BOGIE

El "*trailing wheel bogie*" es un conjunto de ruedas ubicado en la parte trasera y constituye parte del bloque de dirección. Proporciona soporte adicional y estabilidad al vehículo, distribuyendo el peso de manera uniforme y facilitando la navegación en curvas. Está compuesto por un conjunto de ruedas montadas en un *bogie*, permitiendo movimientos independientes para adaptarse a las curvas del ferrocarril.

Los muelles se utilizan para proporcionar suspensión al conjunto de ruedas, lo que ayuda a absorber los impactos y las vibraciones que se producen durante el funcionamiento. Esto es importante para proteger la estructura de la locomotora y su carga de daños causados por el movimiento brusco o las irregularidades del terreno. Además, mantiene la tracción y la estabilidad del vehículo, asegurando un contacto constante entre las ruedas y los rieles.

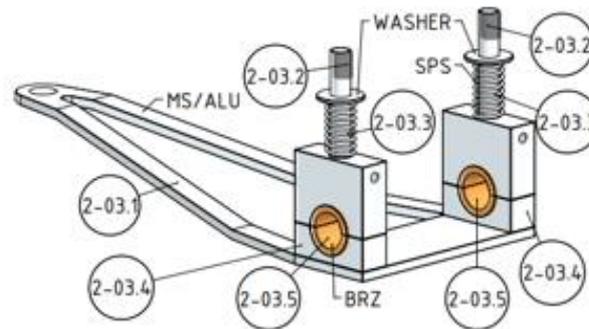


Figura 59. Esquema del *trailing wheel bogie* [1]

2-03.1

El proceso de modelado es el siguiente:

1. Se dibuja un rectángulo en el plano XY y se extruye con la herramienta *Pad* para formar el cuerpo rectangular de la pieza, que servirá como soporte principal.
2. En la cara lateral del bloque, se dibuja un perfil de la pieza y, mediante *Pocket*, se elimina el material, generando la placa con diferentes ángulos de inclinación.
3. En el plano superior, se crea un boceto para generar una forma triangular. Usando *Pocket*, se elimina el material, dejando la estructura triangular aligerada.
4. Se dibujan los círculos para los agujeros de fijación en la base y un agujero en la parte superior. Luego, con la herramienta *Pocket*, se perforan para permitir el ensamblaje.

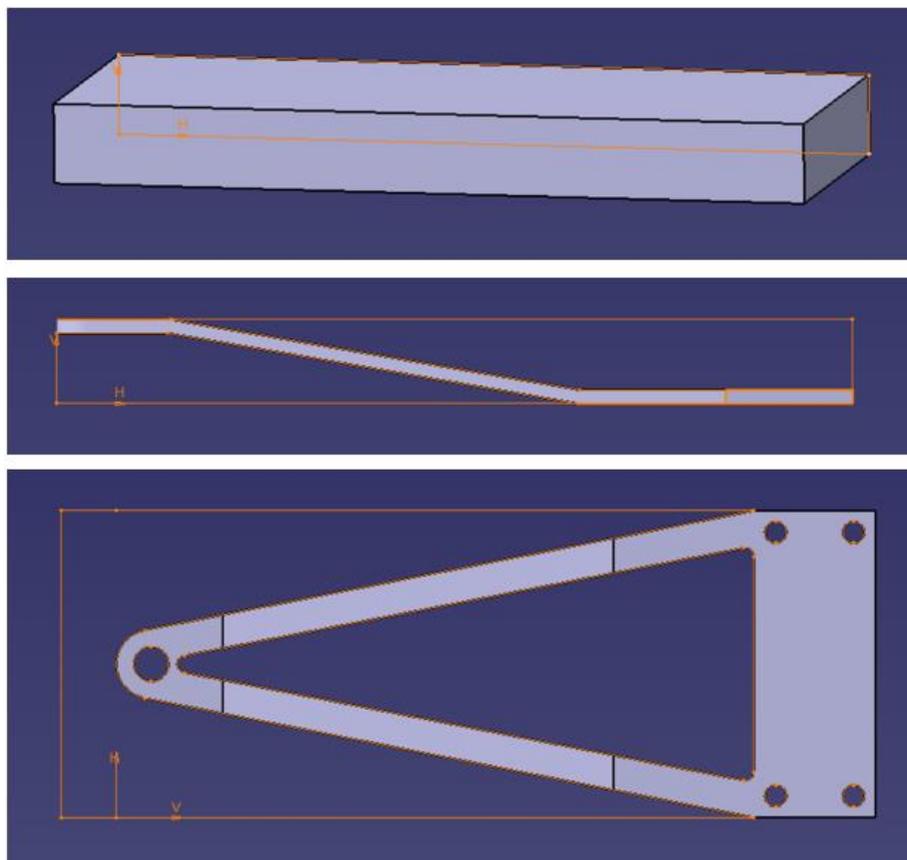


Figura 60. Porceso de modelado de la pieza 2-03.1

2-03.3

Para crear un muelle (resorte), el proceso implica el uso de la herramienta *Helix* para generar la forma helicoidal característica. El proceso de modelado es el siguiente:

1. Primero, se selecciona el plano de trabajo y se dibuja un círculo, que representará la sección transversal del muelle. A continuación, en el módulo *Wireframe and Surface Design*, se accede a la herramienta *Helix*.
2. En la ventana de *Helix*, se ajustan los parámetros necesarios: paso (distancia entre vueltas), radio (distancia del eje a la sección del muelle) y la altura total (longitud del resorte).
3. Una vez definida la hélice, se utiliza la herramienta *Rib* para extruir el perfil circular a lo largo de la curva helicoidal, generando el volumen del muelle.

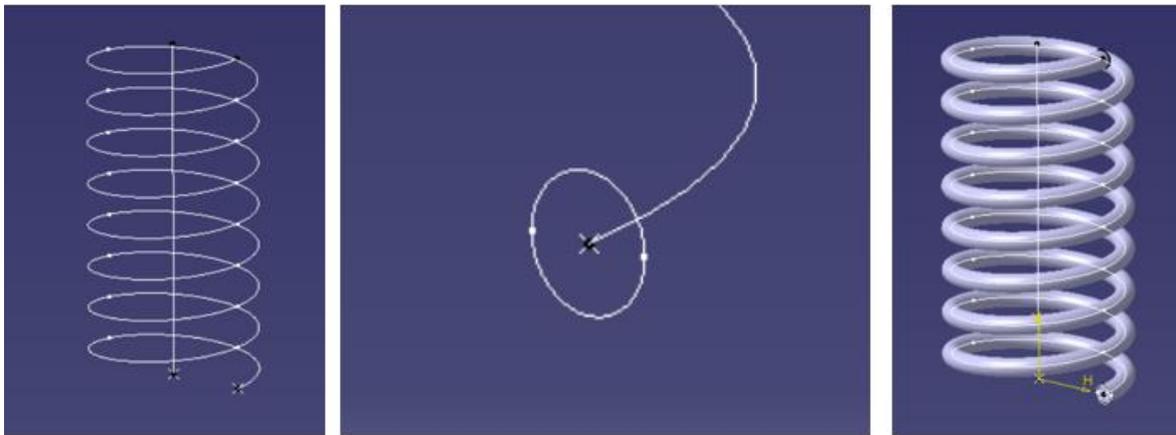


Figura 61. Modelado de la pieza 2-03.3

De esta manera, se han creado todos y cada uno de los muelles necesarios para la construcción de la locomotora.

Finalmente, se muestra el conjunto *trailing wheel bogie* modelado y ensamblado al completo en CATIA V5.

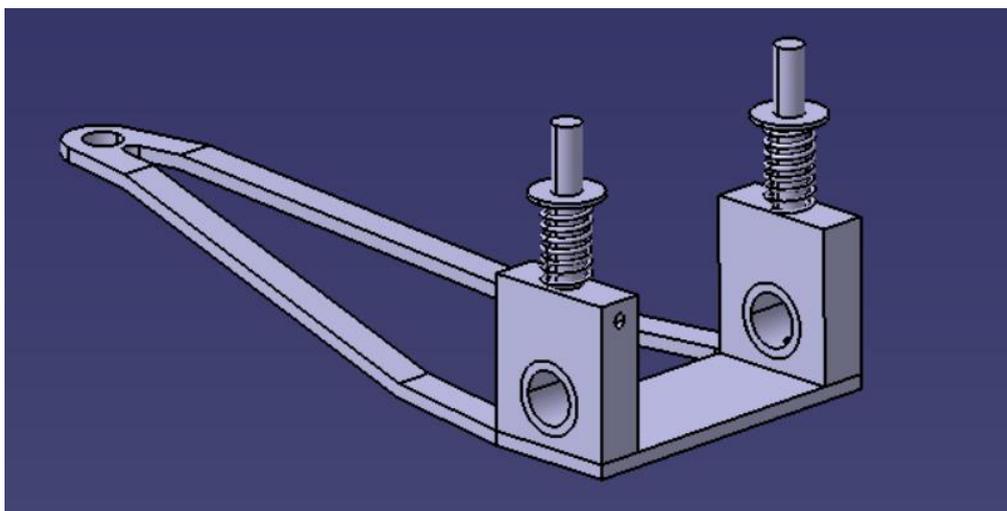


Figura 62. *Trailing wheel bogie* modelado en CATIA V5

4.18 BRAZIL-2-04-TRAILNG WHEEL SET

El "*trailing wheel set*" es un conjunto de ruedas ubicado en la parte trasera. Este componente, junto al anterior, compone el bloque de dirección de la locomotora. Proporciona estabilidad y soporte adicional al vehículo, distribuyendo el peso de manera uniforme y facilitando la navegación en curvas. Es esencial para prevenir el descarrilamiento y garantizar un rendimiento óptimo.

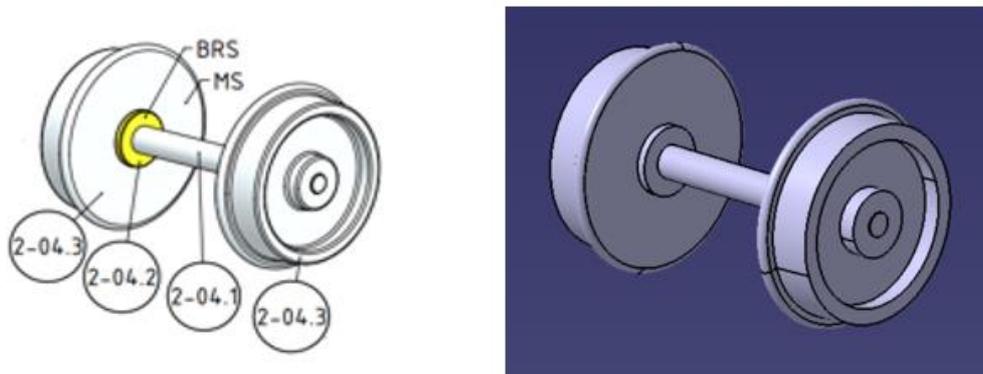


Figura 63. Esquema [1] y modelado del *trailing wheel set* en CATIA V5

El proceso de modelado es similar a los expuestos en los apartados 5.15 y 5.16.

4.19 BRAZIL-2-05-COUPLING ROD

La "*coupling rod*" es una barra que conecta las ruedas motrices de la locomotora, generalmente fabricada en acero o algún otro material resistente y duradero. Su función es transmitir la potencia generada por los pistones a las ruedas, impulsando así el movimiento de la locomotora.

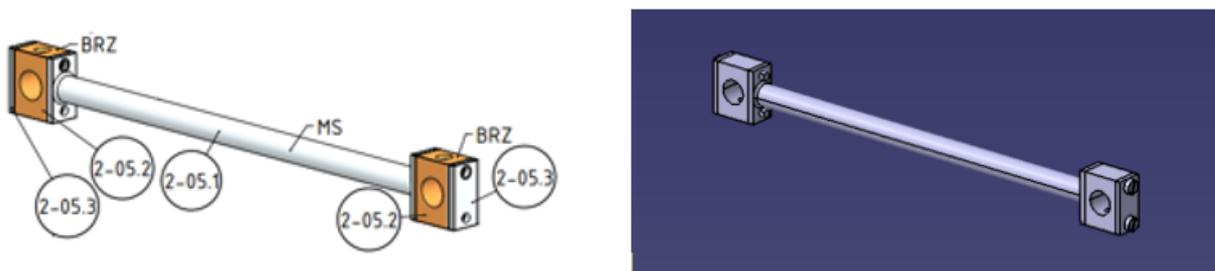


Figura 64. Esquema [1] y modelado del *coupling rod* en CATIA V5

4.20 BRAZIL-2-06-PISTON+CROSSHEAD

El conjunto "*piston + crosshead*" convierte la energía del vapor en movimiento dentro del cilindro. El pistón convierte la energía térmica en movimiento lineal, mientras que la *crosshead* dirige este movimiento hacia la biela. Típicamente están fabricados en acero o hierro fundido.

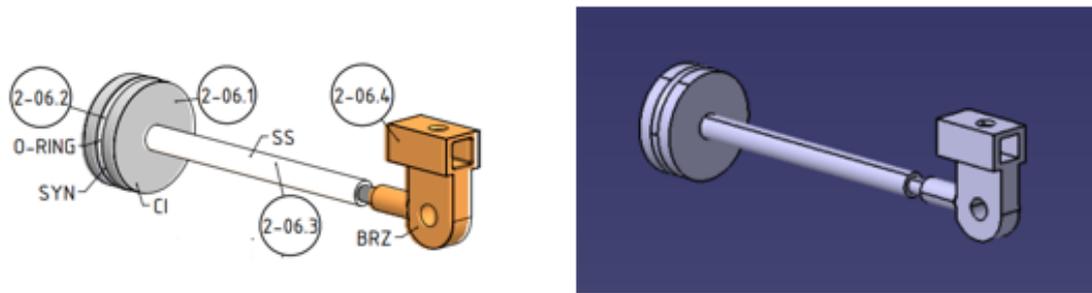


Figura 65. Esquema [1] y modelado del *piston* + *crosshead* en CATIA V5

A continuación, se describe el proceso seguido para modelar las piezas más características del conjunto:

2-06.2

Esta pieza es el pistón propiamente dicho. El proceso de modelado ha sido el siguiente:

1. En el plano ZX, se dibuja media sección del pistón, representando su perfil longitudinal. Esto incluye tanto las dimensiones exteriores del pistón como la ranura superior y los detalles internos de los agujeros. Se sigue el contorno mostrado en la imagen, con las dimensiones correspondientes.
2. Una vez completada la media sección, se utiliza la herramienta *Shaft* para generar el sólido por revolución. El perfil se gira alrededor del eje vertical que representa el centro del pistón, creando un sólido cilíndrico completo.

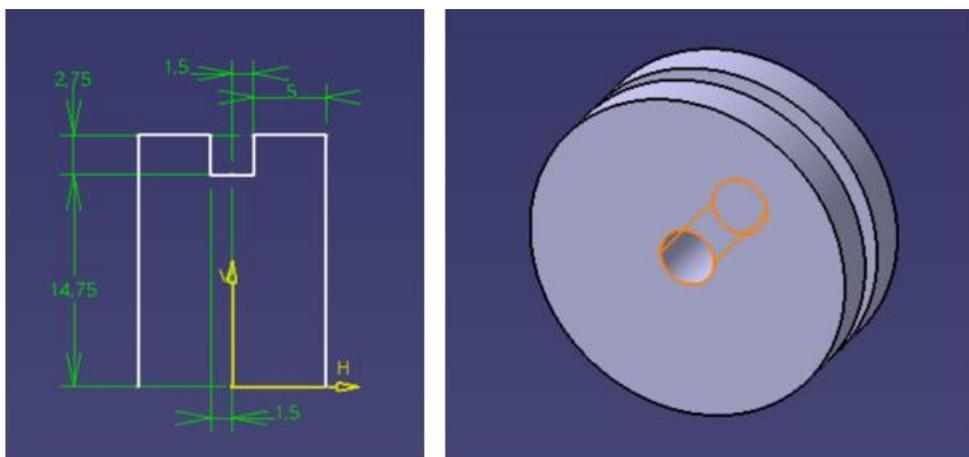


Figura 66. Modelado de la pieza 2-06.2

2-06.4

En este caso, se trata del *crosshead*. Este asegura la correcta transmisión de fuerza y el buen funcionamiento del sistema de movimiento de la locomotora, guiando el vástago del pistón y previniendo desgastes o desalineamientos.

Para modelarlo, se han seguido los siguientes pasos:

1. Se comienza dibujando la sección frontal de la pieza en cualquier plano. Para ello, se traza el perfil de la parte semicircular inferior y el rectángulo superior, tal como se muestra en la primera imagen de la Figura 67.
2. Se utiliza la herramienta *Pad* para extruir este perfil, creando el cuerpo principal de la pieza.
3. En la parte superior de la pieza, se dibujan dos rectángulos, uno dentro de otro, para crear el que será

el hueco rectangular.

4. De nuevo, con la herramienta *Pad*, se extruye dicho boceto para formar en el cuerpo superior.
5. Se dibuja un círculo en la parte superior del rectángulo y se utiliza la herramienta *Pocket* para perforar el agujero central en la cara superior, como se observa en la vista detallada.
6. En la cara lateral de la pieza, se dibuja un círculo para el cilindro (mango o soporte unión a biela) y con la herramienta *Pad*, se extruye ese perfil para crear el cilindro sólido que se proyecta hacia afuera de la pieza.
7. Finalmente, en la cara vista del cilindro, se dibuja un círculo que representa el agujero que atraviesa este componente. Utilizando la herramienta *Pocket*, se perfora el cilindro lateral, creando el paso para la “biela”.

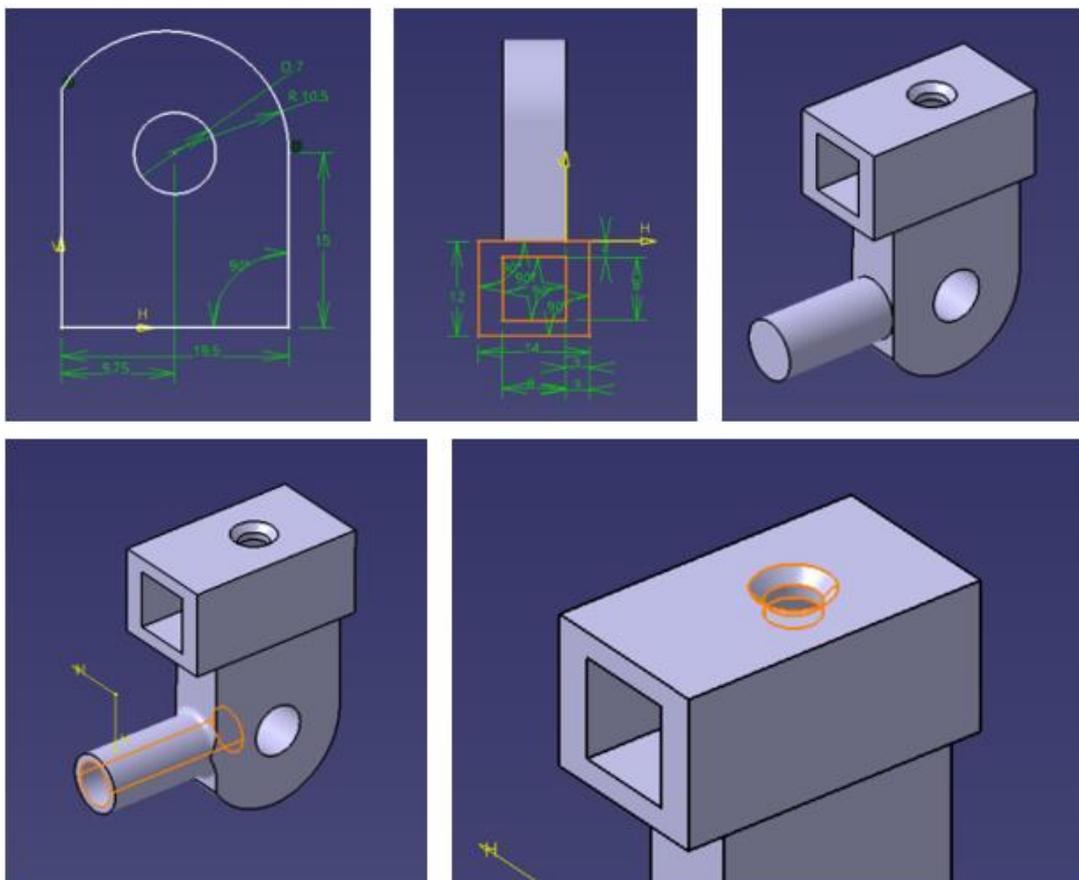


Figura 67. Proceso de modelado de la pieza 2-06.4

4.21 BRAZIL-2-07-CON- ROD

La "con-rod" conecta el pistón con la *crosshead* y el *crankpin* en el *driving wheel set* (conjunto de ruedas motrices), transmitiendo el movimiento lineal del pistón al movimiento rotativo de las ruedas motrices. Fabricada típicamente en acero o hierro fundido.

El "*crankpin*" es un pasador o pivote que se encuentra en el *driving wheel set*. Su función es convertir el movimiento lineal de la biela en movimiento rotativo de la rueda motriz.

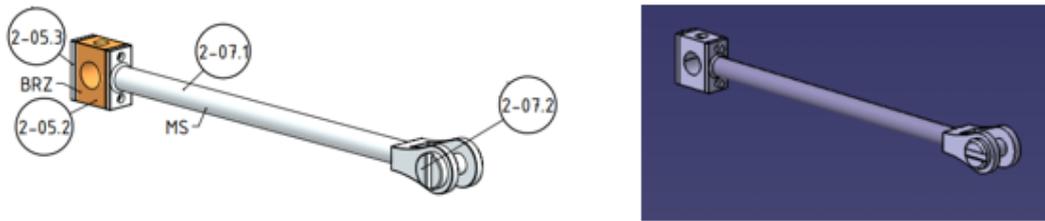


Figura 68. Esquema [1] y modelado del *con-rod* en CATIA V5

2-07.2

Esta pieza es un pasador que permite conectar el *con-rod* al *crosshead*. Se modela en acero, como la mayoría de las piezas de los mecanismos, siguiendo el siguiente proceso:

- En el plano YZ, se dibuja la media sección del perfil longitudinal del tornillo, como se muestra en la primera imagen de la izquierda. Este perfil incluye el cuerpo cilíndrico y la cabeza del tornillo.
- Utilizando la herramienta *Shaft* (revolución), se gira el perfil alrededor de su eje vertical, generando el cuerpo cilíndrico del tornillo.
- En la cara superior de la cabeza del tornillo, se dibuja un rectángulo que representa la ranura para el destornillador.
- Se usa la herramienta *Pocket* para crear la ranura, extrayendo el material de la cabeza en forma de una abertura rectangular.
- Para redondear los bordes de la cabeza del tornillo y suavizar su transición, se aplica un *Fillet* superiores.

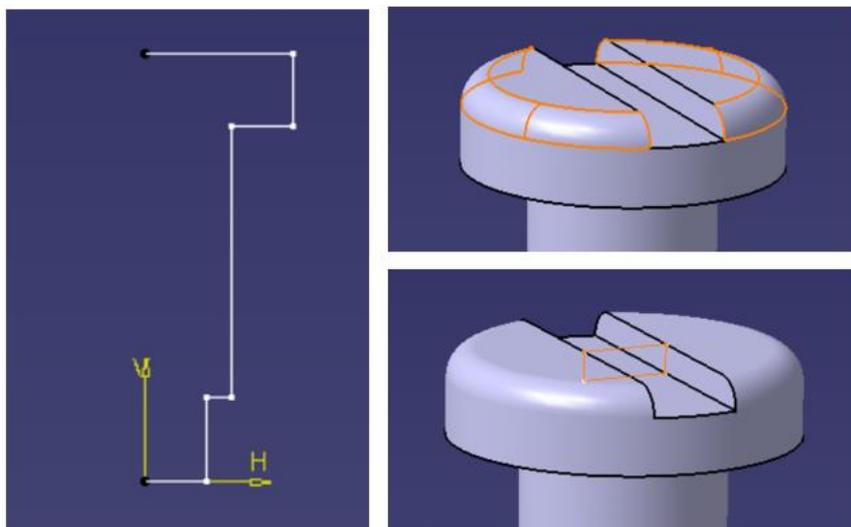


Figura 69. Modelado de la pieza 2-07.2

4.22 BRAZIL-2-08-SLIDE VALVE

La "*slide valve*" es una válvula deslizante que controla el flujo de vapor de los cilindros de la locomotora. Regula la entrada y salida de vapor, lo que dirige el movimiento del pistón. Se modela con materiales resistentes al calor y la presión.

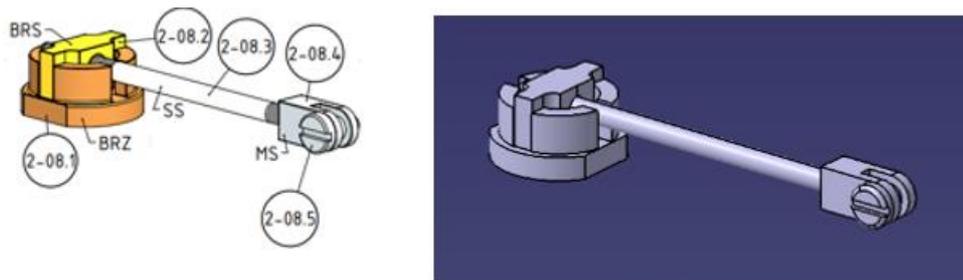


Figura 70. Esquema [1] y modelado del "slide valve" en CATIA V5

2-08.1

Esta pieza es la "cabeza" de la válvula deslizante y actúa como una tapa móvil dentro del cuerpo de la válvula. Se desliza dentro de un espacio ajustado para abrir y cerrar los puertos por donde el vapor entra y sale del cilindro. Las ranuras y formas particulares que tiene ayudan a sellar la válvula, permitiendo que el vapor se distribuya eficientemente y evitando fugas.

El proceso de modelado contiene los siguientes pasos:

1. Dibujar un círculo en el plano XY para la base de la válvula.
2. Usa la herramienta *Pad* para extruir el perfil circular, creando un cilindro sólido con la altura adecuada.
3. Dibujar un segundo círculo concéntrico de menor diámetro en la parte superior del cilindro.
4. Utilizar la herramienta *Pad* para extruir este círculo y crear un escalón en la parte superior del cilindro.
5. Dibujar el perfil de las ranuras internas en la parte superior del cilindro. Usa *Pocket* para cortar material y formar las ranuras internas.
6. De nuevo, en el plano XY. Dibujar dos rectángulos que corten la el cilindro base de manera simétrica, para achatar esta zona del sólido.
7. Usar la herramienta *Pocket* para quitar dicho material.

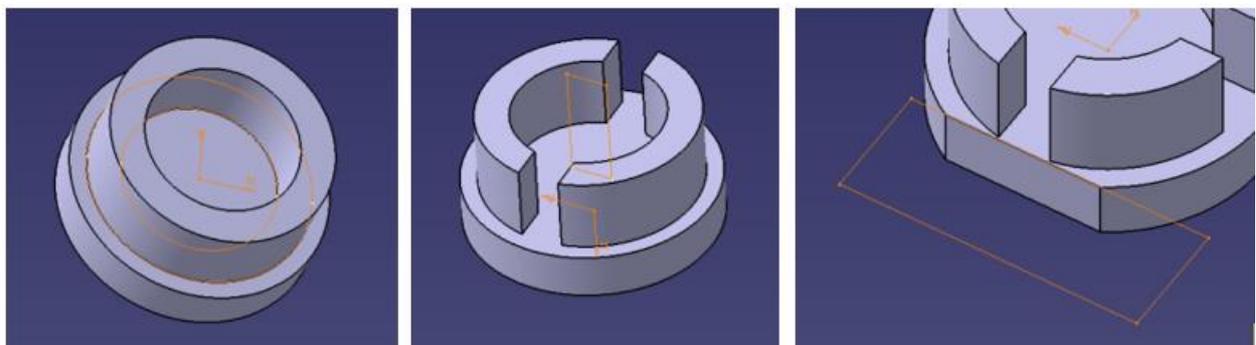


Figura 71. Proceso de modelado de la pieza 2-08.1

4.23 BRAZIL-2-09-EXPANSION LINK+SHAFT

El "expansion link + shaft" es un componente vital en la regulación del vapor. El *expansion link* controla la cantidad de vapor que se suministra a los cilindros, influyendo en la velocidad y el esfuerzo de tracción. Este mecanismo se ajusta mediante el *shaft*, que es el eje sobre el cual el *expansion link* puede moverse para variar la distribución del vapor.

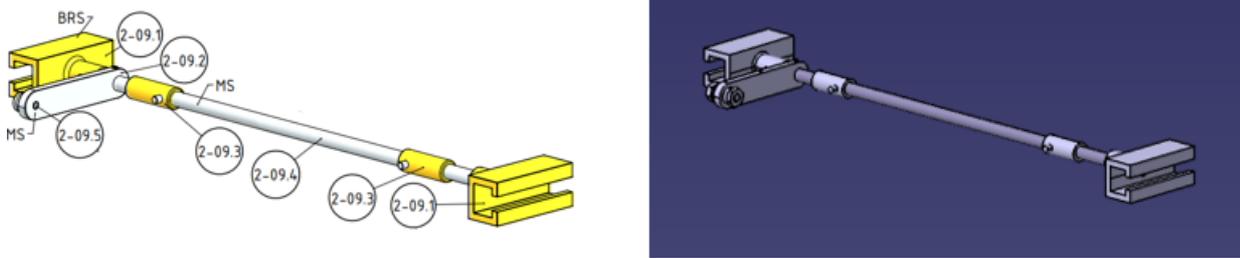


Figura 72. Esquema [1] y modelado del *expansion link* en CATIA V5

El modelado de cada una de las piezas que conforman este elemento se ha llevado a cabo mediante las herramientas *Pad*, *Pocket* y *Shaft*. Se han modelado en acero y latón.

4.24 BRAZIL-2-10-DIE BLOCK

El "*die block*" es un componente esencial que actúa como punto de conexión entre el sistema móvil de transmisión y el sistema de inversión de marcha. Al deslizarse sobre los extremos de la *shaft*, permite una transmisión efectiva del movimiento entre ambos sistemas. Esta función es crucial para facilitar el cambio de dirección de la locomotora de manera suave y controlada, garantizando así su operación segura y eficiente en diversas condiciones.

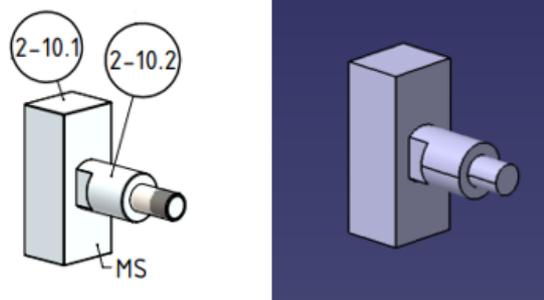


Figura 73. Esquema [1] y modelado del *die block* en CATIA V5

El modelado de esta pieza se ha llevado a cabo mediante las herramientas *Pad* y *Pocket*.

4.25 BRAZIL-2-11-RADIUS BAR

La "*radius bar*" conecta las ruedas con el sistema de dirección. Esta conexión asegura que el movimiento de las ruedas afecte al funcionamiento del *die block* y, por ende, al control de la válvula deslizante.

El modelado de este elemento se realiza de manera sencilla con las herramientas *Pad*, *Pocket* y *Shaft*, siendo esta última esencial para construir el elemento de unión 2-11.2.

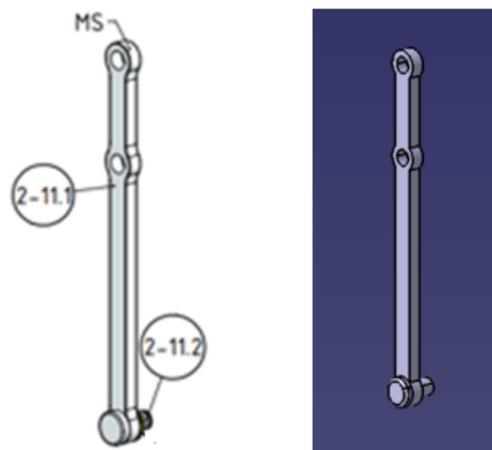


Figura 74. Esquema [1] y modelado de la *radius bar* en CATIA V5

4.26 BRAZIL-2-12-SLIDE VALVE CON-ROD

La "*slide valve con-rod*" conecta la *slide valve* con el *radius bar*. De esta manera, la posición del este influye en el rango de deslizamiento de la *slide valve*, lo que a su vez modifica la marcha de la locomotora. Esta conexión es esencial para controlar y ajustar el funcionamiento del mecanismo de dirección y la marcha de la locomotora de vapor.

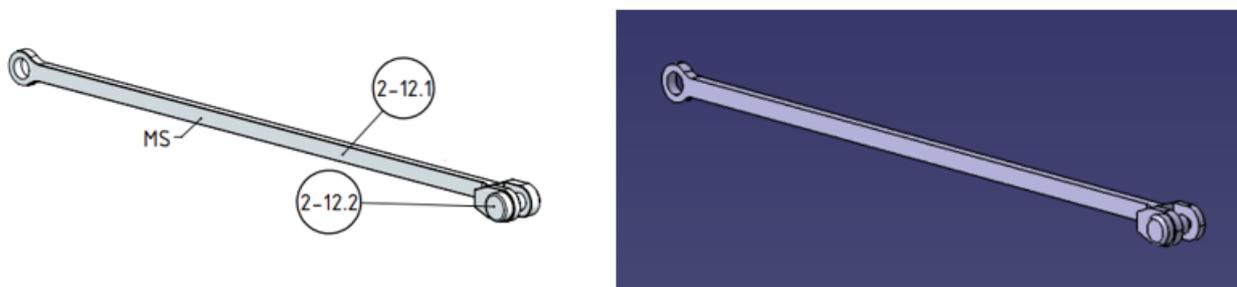


Figura 75. Esquema [1] y modelado de la *slide valve con-rod* en CATIA V5

Al igual que en el caso de la *radius bar*, el modelado de este elemento se realiza de manera sencilla con las herramientas *Pad*, *Pocket* y *Shaft*, siendo esta última esencial para construir el elemento de unión 2-11.2.

4.27 BRAZIL-3-01-FRONT END FOOT PLATE

La "*front end foot plate*" es una placa ubicada en la parte frontal de la locomotora de vapor. Sirve como plataforma de apoyo para los operarios durante tareas de mantenimiento, inspección y operación. Suele estar fabricada en acero resistente.

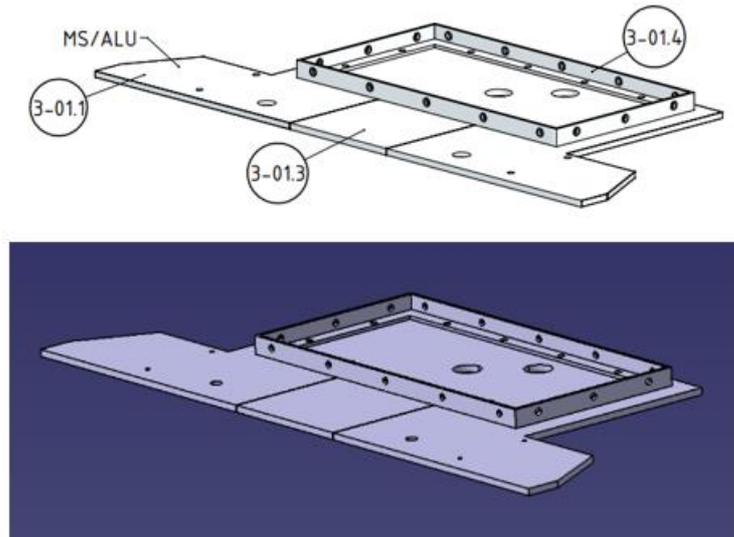


Figura 76. Esquema [1] y modelado de la *front end foot plate* en CATIA V5

Está compuesto por tres piezas del mismo material. Estas son la placa base en forma de T con sus correspondientes perforaciones que permiten la unión, una pequeña tapa para facilitar a los operarios el acceso a los sistemas ubicados bajo la misma, y una escuadra rectangular con diversas perforaciones que permite unir dicha placa al componente que veremos a continuación.

4.28 BRAZIL-3-02-SMOKEBOX SHELL

La "*smokebox shell*" es la carcasa que envuelve la parte delantera de la caldera. Fabricada típicamente en acero resistente al calor y la corrosión, proporciona un espacio donde se recolectan y expulsan los gases de escape producidos por la combustión del carbón o el combustible utilizado. Además de garantizar la visibilidad del maquinista al evitar la acumulación de humo en la cabina, protege la caldera y otros componentes de la locomotora del calor y los elementos externos.

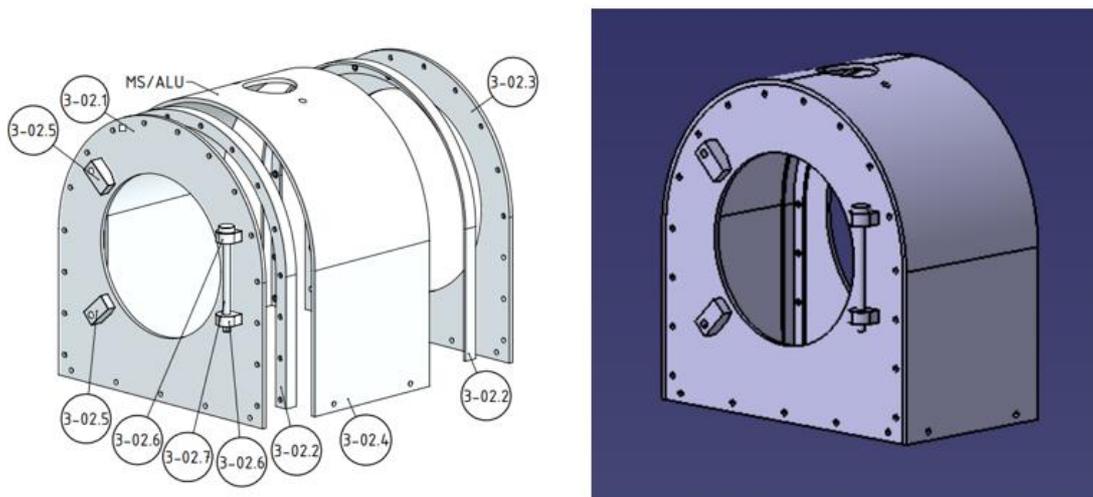


Figura 77. Esquema [1] y modelado de la *smokebox shell* en CATIA V5

El modelado de cada una de las piezas que la conforman se ha realizado con las herramientas *Pad* y *Pocket*.

4.29 BRAZIL-3-03-SMOKEBOX DOOR

La "smokebox door" es la puerta ubicada en la parte frontal de la *smokebox shell*. Esta puerta facilita el acceso al interior de la misma para llevar a cabo tareas de mantenimiento, inspección y limpieza, contribuyendo así al mantenimiento adecuado y al funcionamiento óptimo de la locomotora. Se fabrica típicamente en acero resistente al calor y la corrosión.

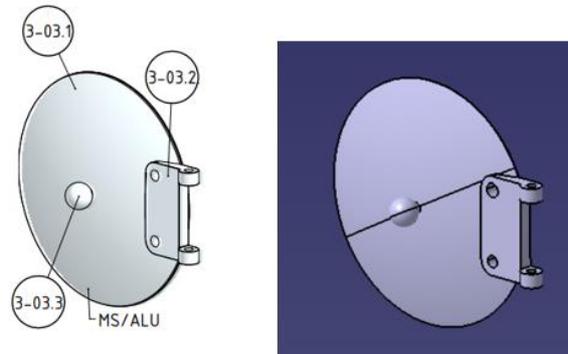


Figura 78. Esquema [1] y modelado de la *smokebox door* en CATIA V5

A continuación, a pesar de no diferir demasiado de otras piezas anteriormente descritas, se recoge el proceso de modelado seguido para obtener la puerta:

3-03.1

El proceso de modelado de esta pieza se realiza de la siguiente manera:

1. Se dibuja la media sección de la tapa en un boceto en vista lateral, donde se define la forma del perfil de la pieza.
2. Utilizando la herramienta *Shaft*, se genera el sólido de revolución a partir del perfil dibujado, creando así el cuerpo cilíndrico o circular de la tapa.
3. A continuación, se crean las perforaciones sobre la superficie superior de la pieza usando la herramienta *Pocket*. Estas perforaciones, para fijación mediante tornillos, se ubican en las posiciones necesarias de acuerdo a las especificaciones de diseño.
4. Para crear el alojamiento de la bisagra, se realiza un *Pocket*. Esto implica dibujar la geometría de la ranura en el área correspondiente y luego utilizar la herramienta de extracción de material para crear la ranura que permitirá el acoplamiento de la bisagra.
5. Finalmente, se aplica la herramienta *Fillet* para redondear los bordes de la tapa, evitando así bordes afilados.

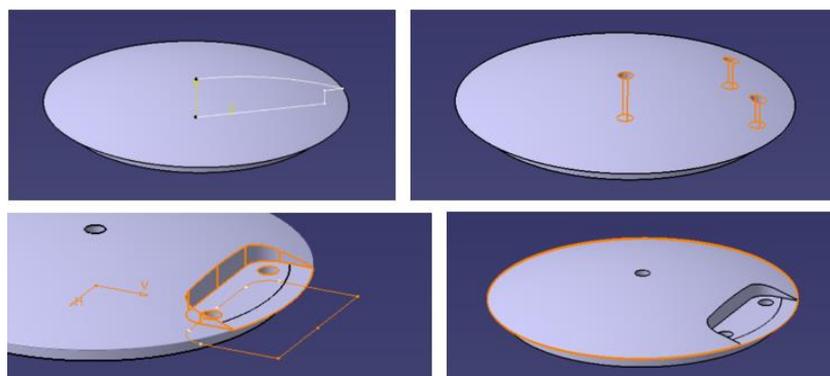


Figura 79. Modelado de la pieza 3-03.1 en CATIA V5

4.30 BRAZIL-3-04-SMOKE STACK

El "smoke stack", o chimenea, permite la expulsión de los gases de combustión generados en la caldera hacia la atmósfera. Se ubica en la parte frontal superior de la locomotora, y mantiene una presión adecuada en la caldera al proporcionar una vía de escape para el humo, las cenizas y otros subproductos de la combustión. Además, contribuye a mantener la visibilidad del maquinista durante la operación.

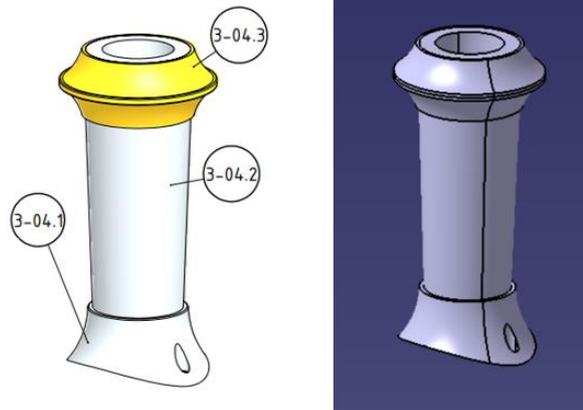


Figura 80. Esquema [1] y modelado de la *smoke stack* en CATIA V5

Gracias a la forma cilíndrica de las piezas que la componen se modelan fácilmente con la herramienta *Shaft*. Como materiales, se emplea el aluminio y el latón, disminuyendo así el peso de la locomotora. A continuación, se indican los pasos seguidos para modelar la base de la chimenea, que permite fijarla en la parte superior de la *smokebox shell*.

3-04.1

Esta pieza, de aluminio, se corresponde con la base de la chimenea y permite fijarla a la superficie curva de la caja de humos. El proceso seguido para su modelado es el siguiente:

1. En un plano adecuado, se dibuja la media sección de la pieza que define el perfil del cuerpo cónico.
2. Utilizando el perfil dibujado, se genera el sólido mediante la herramienta *Shaft*, girando la sección alrededor de un eje central, lo que crea la forma cónica característica.
3. En el mismo plano, se dibuja una circunferencia que intersecciona la parte inferior del sólido generado. Esta operación recorta el sólido para crear una superficie curva, que permitirá el encaje de la pieza sobre la caja de humos.
4. Por último, se crean dos perforaciones utilizando la herramienta *Pocket*. Estas perforaciones se utilizan para la fijación de la pieza.

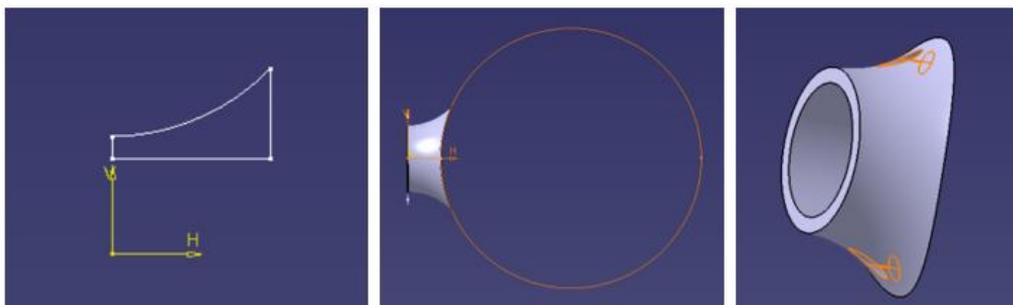


Figura 81. Modelado de la pieza 3-04.1 en CATIA V5

4.31 BRAZIL-3-05-PETTICOAT PIPE

La "*petticoat pipe*" es un componente vital ubicado dentro de la *smokebox shell* que, además de encajar bajo la chimenea y facilitar su fijación, permite que el humo saliente de la caldera se mezcle con el vapor de escape, generando un efecto de succión que aumenta el flujo de aire a través de la caldera. Esto no solo mejora la eficiencia de la combustión del combustible, sino que también ayuda a extraer los gases de combustión de la locomotora, contribuyendo así a un funcionamiento más eficiente y seguro.

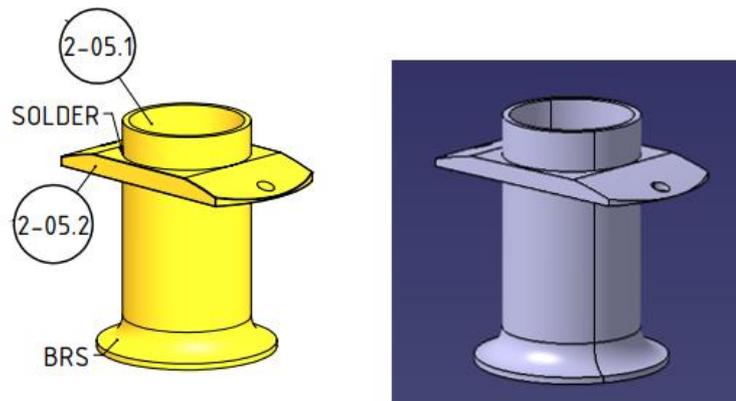


Figura 82. Esquema [1] y modelado de la *petticoat pipe* en CATIA V5

El modelado en latón de las dos piezas que lo conforman se realiza con las herramientas *Shaft*, *Pad* y *Pocket*.

4.32 BRAZIL-3-06-REAR END FOOT PLATE

El "*rear end foot plate*" es una plataforma ubicada en la parte trasera, que proporciona un área de acceso para los operarios durante el mantenimiento, la inspección o la operación de la locomotora. Además, permite la fijación de la cubierta trasera, así como de otros mecanismos que se mostrarán más adelante.

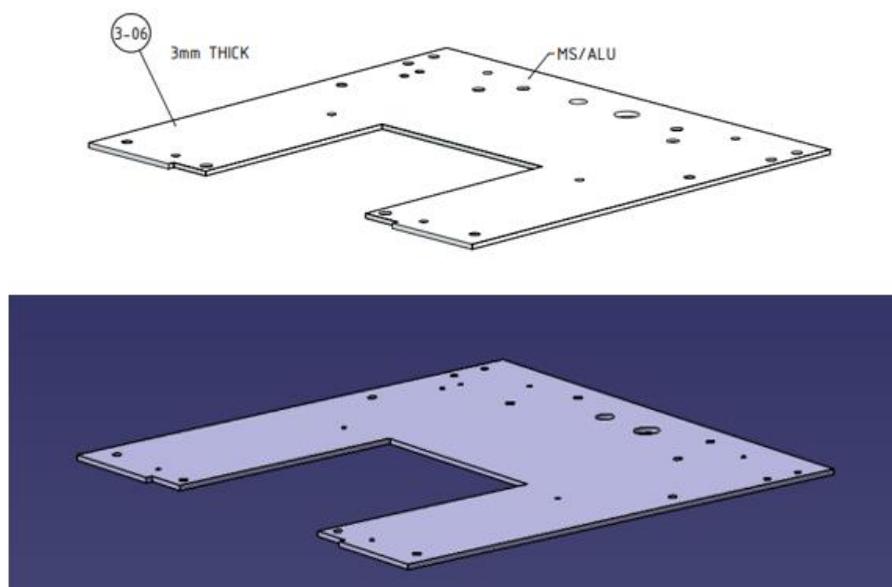


Figura 83. Esquema [1] y modelado de la *rear end foot plate* en CATIA V5

Este componente se modela en acero, siendo necesaria únicamente la herramienta *Pad*.

4.33 BRAZIL-3-07-REAR STEP

El "*rear step*" es un escalón ubicado en la parte trasera que facilita el acceso a la locomotora desde el suelo, permitiendo a los trabajadores subir y bajar de manera segura durante tareas de mantenimiento, inspección o operación. Este componente se modela en latón con las herramientas *Pad* y *Pocket*.

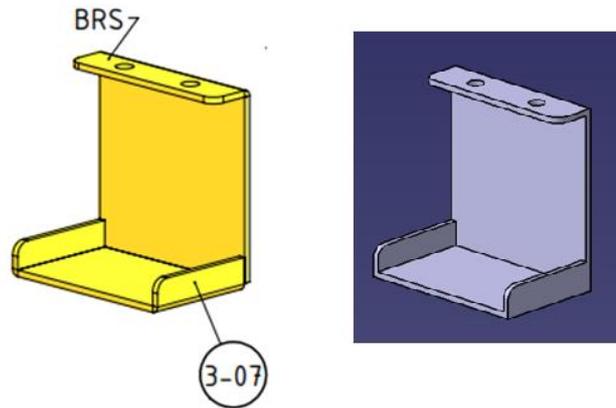


Figura 84. Esquema [1] y modelado de la *rear step* en CATIA V5

4.34 BRAZIL-3-08-FUEL TANK

El "*fuel tank*" es un tanque de almacenamiento ubicado en la parte trasera de la locomotora, diseñado para contener el combustible necesario para su funcionamiento. Su función es proporcionar un suministro constante de aceite, al sistema de caldera para generar vapor y alimentar los cilindros.

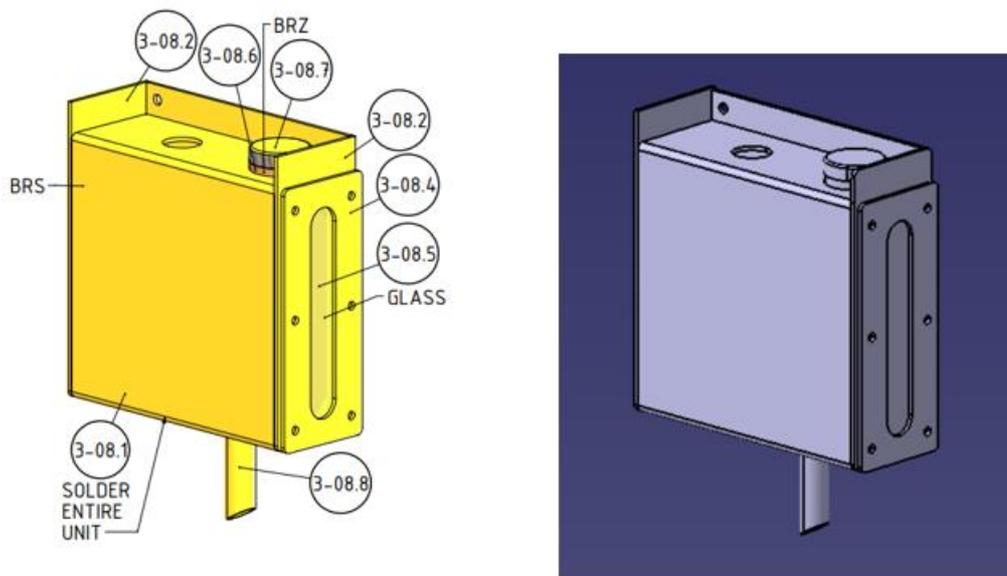


Figura 85. Esquema [1] y modelado del *fuel tank* en CATIA V5

El tanque dispone de un tapón para facilitar el llenado, un hueco para colocar la válvula que permite enviar aceite hacia el sistema de quemado y una ventana lateral para ver el nivel del fluido en el interior del mismo. La herramientas empleadas para ello son *Pad*, *Pocket* y *Shaft*. En cuanto a los materiales, la mayoría de sus

piezas se modelan en latón, excepto el material transparente de la ventana que se modela en cristal y una junta del tapón que se modela en bronce.

4.35 BRAZIL-3-09-FUEL TANK CONTROL VALVE

La "tank control valve" es la válvula, mencionada en el apartado anterior, utilizada en el sistema de suministro de combustible. Su función es regular el flujo de combustible desde el tanque de almacenamiento hacia la caldera de la locomotora. Esto permite mantener la presión de vapor requerida y proporcionar la potencia necesaria para la tracción del tren.

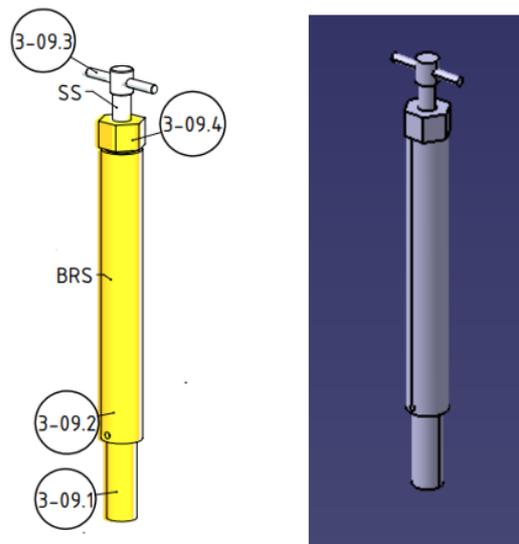


Figura 86. Esquema [1] y modelado de la *tank control valve* en CATIA V5

Las piezas que componen la válvula se modelan fácilmente con las herramientas *Pad* y *Pocket*. Como materiales, se han utilizado latón y acero. A continuación, se describe el proceso de modelado de la palanca de bombeo.

3-09.3

La palanca para el bombeo manual se caracteriza por estar diseñada a partir de segmentos cilíndricos de acero, por lo que su modelado no presenta complejidad alguna. Los pasos seguidos para su modelado son los siguientes:

1. En cualquier plano, dibujar un círculo con la medida pertinente.
2. Con la herramienta *Pad*, extruir el boceto para crear la cabeza cilíndrica de la palanca.
3. En una de las caras circulares del cilindro formado, dibujar un nuevo círculo concéntrico de menor tamaño.
4. Con *Pad*, extruir el nuevo círculo para crear el cilindro que compone la mayor parte de la longitud de la pieza.
5. En la cara libre del último cilindro, realizar de nuevo los pasos 3 y 4 con las medidas necesarias.
6. En el extremo de la pieza, dibujar un triángulo rectángulo en el plano longitudinal, tal y como se muestra en la Figura 87.
7. Con la herramienta *Groove*, eliminar el material para darle forma cónica al extremo de la pieza.
8. En el plano longitudinal, pero en este caso a la altura de la cabeza de la válvula, dibujar un círculo.

9. Por último, con *Pad*, extruir el círculo con la opción *Mirrored extent* activada, creando así el mango.

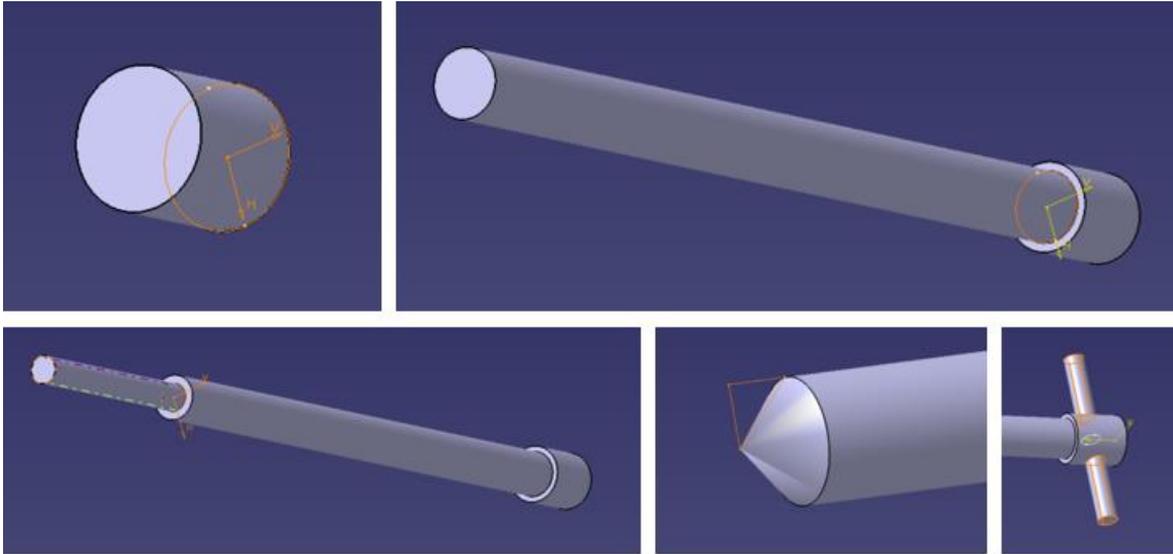


Figura 87. Proceso de modlado de la pieza 3-09.3 en CATIA V5

4.36 BRAZIL-3-10-REVERSING LEVER STAND

El "*reversing lever stand*" es una estructura que sostiene el "*reversing lever*". El *reversing lever* es una palanca utilizada para controlar la dirección de movimiento de la locomotora, y el *reversing lever stand* proporciona un punto de apoyo estable para esta palanca. Esta estructura está diseñada para resistir las fuerzas generadas durante la operación de la locomotora y asegurar que el mecanismo pueda accionarse con suavidad y precisión para cambiar la dirección de la locomotora según sea necesario.

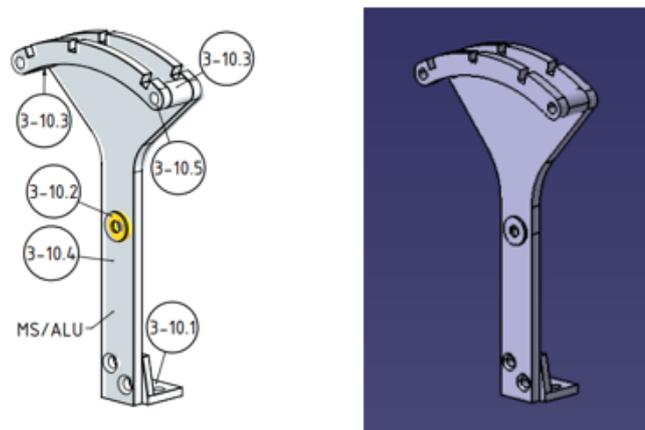


Figura 88. Esquema [1] y modelado del *reversing lever stand* en CATIA V5

Se prescinde de la explicación del modelado de las piezas que lo componen, ya que se ha empleado únicamente la herramienta *Pad* y *Chamfer*, siendo esta última una opción para crear avellanados en los taladros que lo requieran.

4.37 BRAZIL-3-11-REVERSING LEVER

Como se introdujo en el apartado anterior, el *reversing lever* es la palanca utilizada para controlar la dirección de movimiento de la locomotora. Esta palanca se utiliza para cambiar entre la marcha hacia adelante y hacia atrás, lo que afecta la dirección de la rotación de las ruedas y, por lo tanto, la dirección de movimiento del tren.

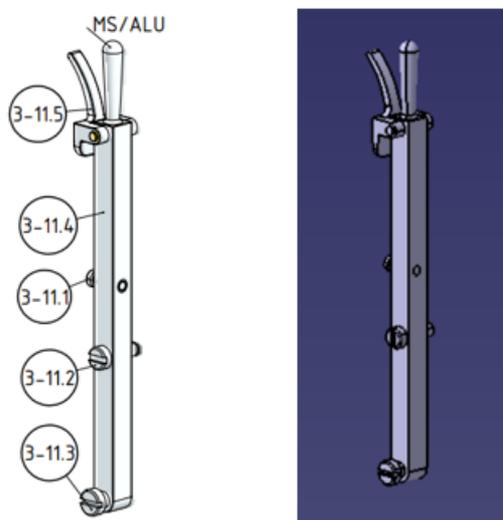


Figura 89. Esquema [1] y modelado de la *reversing lever* en CATIA V5.

Todas las piezas que componen la palanca se han modelado de manera sencilla en acero con las herramientas *Pad*, *Pocket* y *Shaft*.

4.38 BRAZIL-3-12-REVERSING LEVER SPRING

El "*reversing lever spring*" es un resorte utilizado en el mecanismo del *reversing lever*. Se encarga de proporcionar tensión y retornar la manivela de activación (pieza 3-11.5 del *reversing lever*) a su posición central después de realizar un cambio de dirección, manteniendo así la palanca en una posición estable y facilitando su manipulación por parte del maquinista.

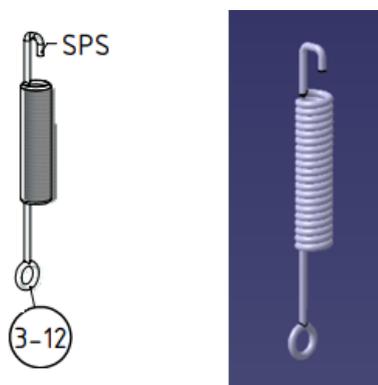


Figura 90. Esquema [1] y modelado del *reversing lever spring* en CATIA V5

Este resorte se ha modelado exactamente igual que el descrito con anterioridad en el apartado 5.17, pero añadiendo las prolongaciones en los extremos usando *Pad*.

4.39 BRAZIL-3-13-REACH ROD

El "*reach rod*" es una barra de enlace que se utiliza en el mecanismo de inversión. Su función principal es transmitir el movimiento desde el *reversing lever* hacia el *reverse shaft* o eje de inversión, que a su vez controla la posición de la *reversing gear* o mecanismo de inversión. Esta barra permite al maquinista controlar la dirección y la marcha de la locomotora de vapor de manera efectiva.

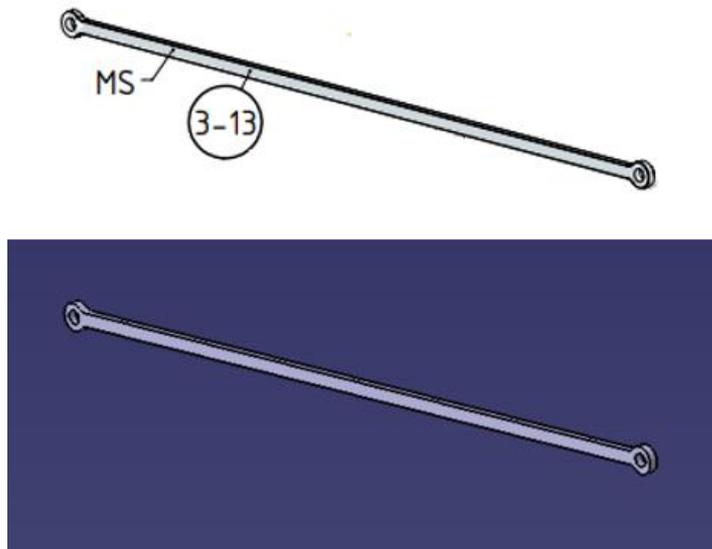


Figura 91. Esquema [1] y modelado de la *reach rod* en CATIA V5

4.40 BRAZIL-4-01-BOILER SHELL

La "*boiler shell*" es la carcasa exterior de la caldera. Esta estructura envuelve y protege los componentes internos de la caldera, como los tubos de agua y de fuego, así como otros accesorios y dispositivos relacionados con la generación de vapor. Soporta las altas temperaturas y presiones generadas durante el funcionamiento de la locomotora, garantizando su integridad estructural y seguridad. A pesar de ser fabricada típicamente en acero resistente, en este proyecto se emplea cobre para el modelado de la misma.

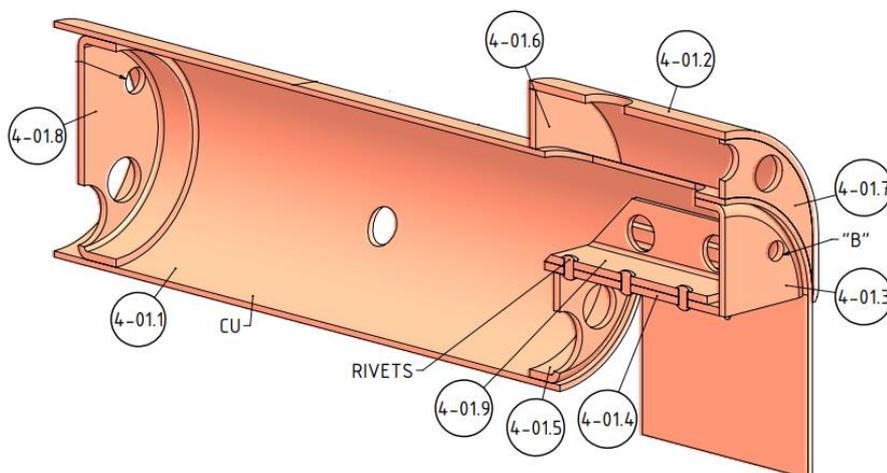


Figura 92. Esquema de la *boiler shell* [1]

Para el desarrollo de este componente, al igual que en la mayoría de piezas del proyecto, han sido necesarias las herramientas *Pad*, *Pocket*, *Shaft* y *Fillet*, no siendo necesario el uso de todas ellas en cada una de las piezas, tal y como veremos a continuación.

4-01.1

Esta pieza se corresponde con la estructura principal de la caldera. Se caracteriza por tener forma tubular y ser una de las piezas de mayor tamaño del proyecto. Modelada en cobre, se han seguido los siguientes pasos:

1. Dibujar un anillo en cualquier plano, con las medidas indicadas en los planos.
2. Extruir con *Pad* el dibujo para crear un sólido tubular .
3. En una de las caras circulares del sólido, dibujar una sección en forma de U invertida con el mismo ancho exterior que el anillo inicial.
4. Extruir este nuevo boceto.
5. Con la herramienta *Plane*, crear planos tangentes al cuerpo tubular en las posiciones necesarias, para poder realizar nuevos bocetos de circunferencias y extraer el material con *Pocket*. De esta manera, se crean las perforaciones en la caldera necesarias.
6. De manera semejante al punto 5, pero usando los planos longitudinales vertical y horizontal, crear los orificios pertinentes.

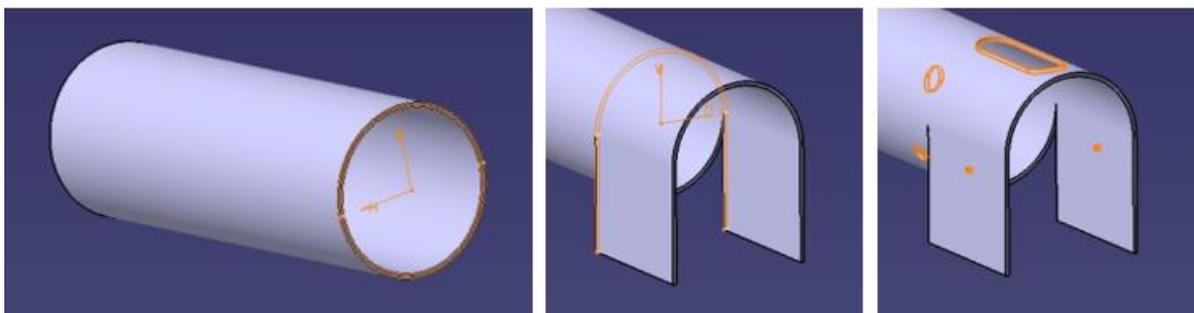


Figura 93. Modelado de la pieza 4-01.1 en CATIA V5

En la Figura 94 se muestra dicho componente modelado al completo en CATIA V5

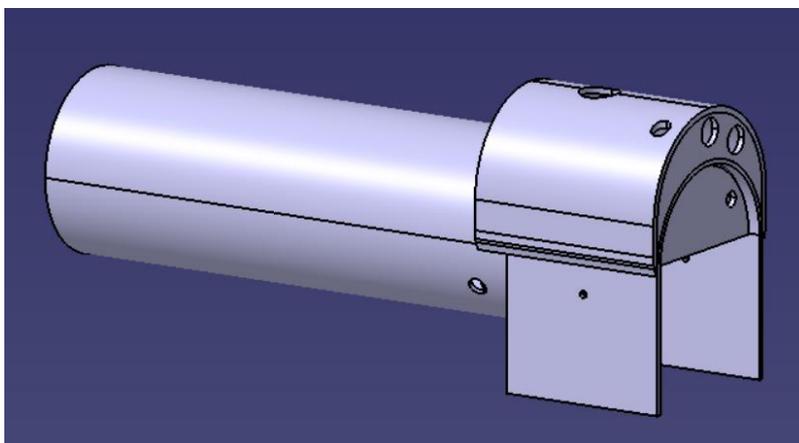


Figura 94. Modelado de la *boiler shell* en CATIA V5

4.41 BRAZIL-4-02-BOILER FLUE PIPE-TYPE-1

El "*boiler flue pipe*" es un conducto que forma parte del sistema de la caldera. Este conducto está diseñado para permitir que los gases calientes generados durante la combustión en la caldera pasen a través de él y sean expulsados hacia la chimenea. Ayuda a transferir el calor desde los gases de combustión al agua de la caldera, aumentando así la temperatura y la presión del vapor. Suelen estar fabricados con materiales metálicos con gran capacidad conductora del calor. Para este proyecto, como ya se indicó en el apartado anterior, se usa cobre.

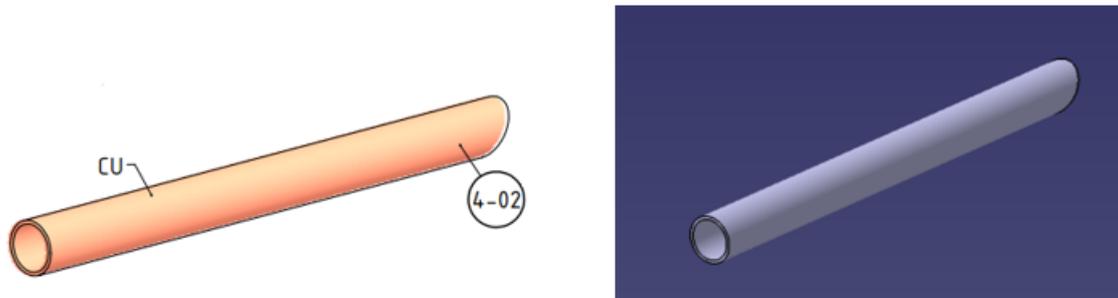


Figura 95. Esquema [1] y modelado de la *boiler flue pipe* en CATIA V5

4.42 BRAZIL-4-03-BOILER FLUE PIPE-TYPE-2

Este conducto presenta exactamente la misma función que el anterior. La única diferencia es que, debido al diseño, su diámetro es menor.

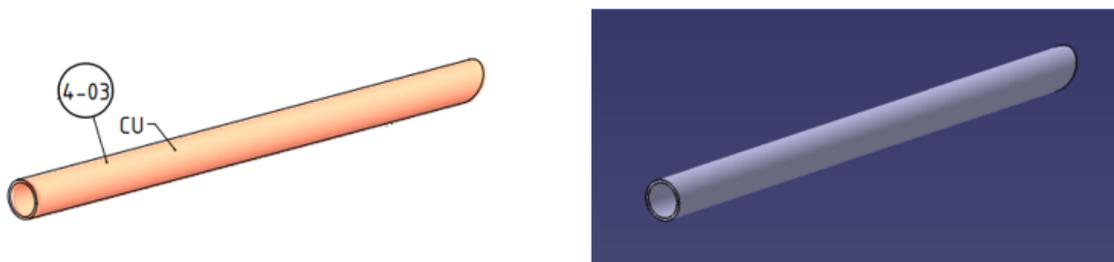


Figura 96. Esquema [1] y modelado de la *boiler flue pipe-type-2* en CATIA V5

4.43 BRAZIL-4-04-BOILER BUSH-TYPE-1

El "*Boiler Bush*" es un componente utilizado para conectar accesorios, como tuberías o válvulas, a la caldera sin comprometer su integridad. Tiene forma cilíndrica y se fabrica en materiales resistentes a altas temperaturas y presiones, permitiendo un acople seguro y hermético para la instalación de equipos de medición, control o escape de vapor.

Las herramientas utilizadas para su construcción son *Pad* y *Pocket*, y se ha escogido bronce como material de construcción.

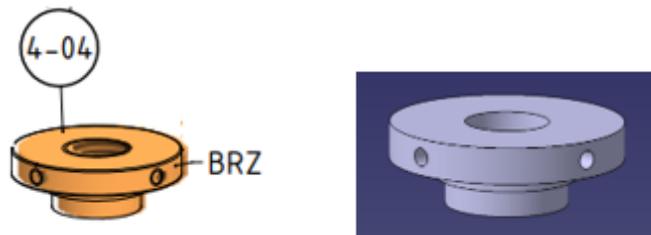


Figura 97. Esquema [1] y modelado de la *Boiler Bush-Type-1* en CATIA V5

4.44 BRAZIL-4-05-BOILER BUSH-TYPE-2

En este caso, hablamos de otro componente utilizado para conectar accesorios similar al anterior en cuanto a material y método de modelado.



Figura 98. Esquema [1] y modelado de la *Boiler Bush-Type-2* en CATIA V5

4.45 BRAZIL-4-06-STAY-BLOWER PIPE

La *Stay-Blower Pipe* es una tubería o conducto utilizado en la caldera para canalizar vapor hacia la caja de fuego, ayudando a mantener una circulación de aire adecuada, lo que permite una mejor transferencia de calor y una mayor potencia del sistema.

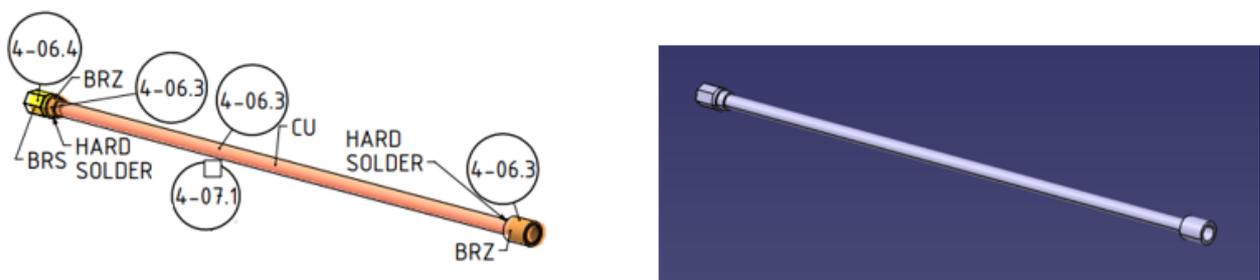


Figura 99. Esquema [1] y modelado de la *Stay-Blower Pipe* en CATIA V5

La forma tubular de las piezas que la componen permite un fácil modelado mediante *Pad* y *Pocket*. Los materiales son cobre, bronce y latón, siendo estos dos últimos los más resistentes empleados para las conexiones de la tubería.

4.46 BRAZIL-4-07-WATER-PRESSURE GAUGE TOP FITTING

La "water-pressure gauge top fitting" es una conexión ubicada en la parte superior de la caldera que permite enviar vapor al manómetro de presión y al nivel del depósito de agua, asegurando su correcto funcionamiento.

Al igual que en las demás piezas de este tipo, los materiales escogidos son cobre, bronce y latón.

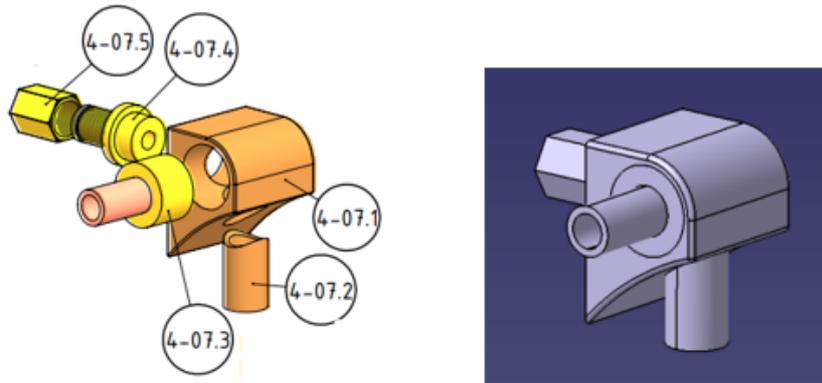


Figura 100. Esquema [1] y modelado de la *water-pressure gauge top fitting* en CATIA V5

4-07.1

Esta pieza es el bloque principal de la *water-pressure gauge top fitting*. Se modela en bronce con las herramientas *Pad* y *Pocket*. Los pasos seguidos son los siguientes:

1. Dibujar la sección de la pieza en cualquier plano.
2. Con *Pad*, extruir para crear un bloque sólido.
3. En los planos pertinentes, realizar bocetos con círculos que representen los orificios de la pieza.
4. Con *Pocket*, extraer el material hasta obtener la profundidad deseada.
5. Finalmente, con *Fillet*, redondear los bordes indicados en la Figura 101.

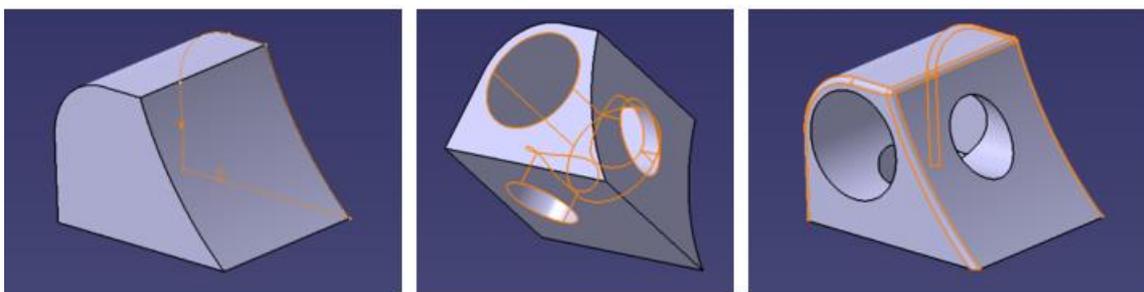


Figura 101. Modelado de la pieza 4-07.1 en CATIA V5

4.47 BRAZIL-4-08-WATER GAUGE BOTTON FITTING

La "water gauge bottom fitting" es una conexión ubicada en la parte inferior del medidor de nivel de agua. Se utiliza para fijar el medidor de nivel de agua en su posición y asegurar su correcto funcionamiento. Además, sirve como punto de salida para el agua que se utiliza en el medidor, permitiendo que este mida con precisión el nivel de agua dentro de la caldera.

Sus piezas se construyen con *Pad* en latón y cobre.

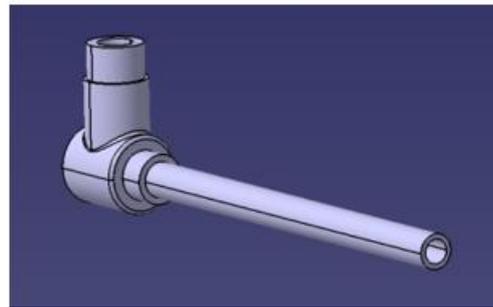
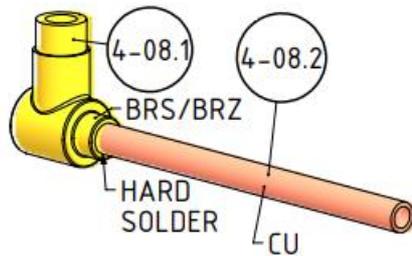


Figura 102. Esquema [1] y modelado de la *water gauge bottom fitting* en CATIA V5

4.48 BRAZIL-4-09-SAFETY VALVE

La "*safety valve*" (válvula de seguridad) protege la caldera de la locomotora contra el exceso de presión, evitando que la presión interna de la caldera exceda un nivel seguro. Cuando la presión del vapor en la caldera alcanza un punto peligrosamente alto, la válvula se abre automáticamente, permitiendo que el vapor escape hacia la atmósfera hasta que la presión vuelva a un nivel seguro. Esto ayuda a prevenir la explosión de la caldera y protege la locomotora, los pasajeros y el personal contra posibles daños o lesiones.

Por otro lado, se puede actuar sobre ella para que libere vapor aún cuando no alcanza niveles de presión excesivamente altos y generar así señales acústicas. En este caso, hablamos del sistema *train whistle*, el cual no fue desarrollado por el diseñador de este modelo. Este elemento es uno de los dos que se han diseñado desde cero para completar la locomotora, por lo que se mostrará al final de este capítulo.

Como se puede observar a simple vista en la Figura 103, la longitud de la pieza 4-09.3 ha sido aumentada como consecuencia de la implementación del *train whistle*.

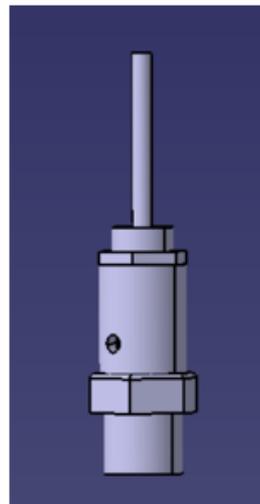
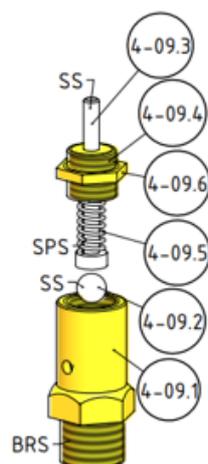


Figura 103. Esquema [1] y modelado de la *safety valve* en CATIA V5

Se prescinde de la explicación del modelado de sus piezas al ser similar a otras ya comentadas en apartados anteriores. Han sido necesarias las herramientas *Pad*, *Pocket*, *Shaft* y *Helix*, y los materiales latón y acero.

4.49 BRAZIL-4-10-SAFETY VALVE DOME

El "*safety valve dome*" es una estructura que alberga la válvula de seguridad en la parte superior de la caldera. Su función principal es proporcionar un espacio protegido y accesible, permitiendo que funcione de manera eficiente y confiable. La ubicación en la parte superior de la caldera asegura que la válvula pueda liberar el vapor de manera efectiva en caso de que la presión en la caldera alcance niveles peligrosos. Además, el diseño del ayuda a dirigir el vapor liberado hacia arriba y hacia afuera de la locomotora, alejándolo de áreas sensibles y reduciendo el riesgo de lesiones para el personal y los pasajeros.

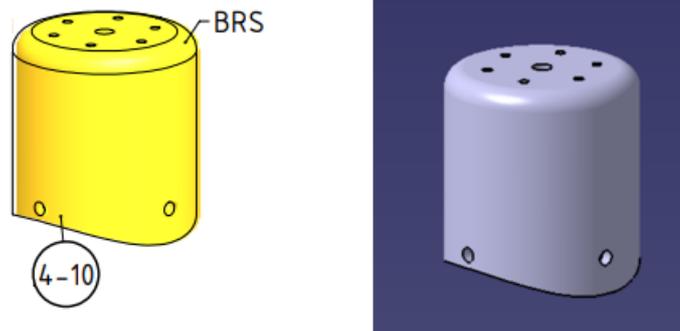


Figura 104. Esquema [1] y modelado de la *safety valve dome* en CATIA V5

Se modela fácilmente en latón mediante *Shaft* y *Pocket*.

4.50 BRAZIL-4-11-WATER GAUGE

El "*water gauge*" es un dispositivo utilizado para medir el nivel de agua en la caldera. Consiste en un tubo de vidrio transparente montado total o parcialmente vertical en la cabina del maquinista.

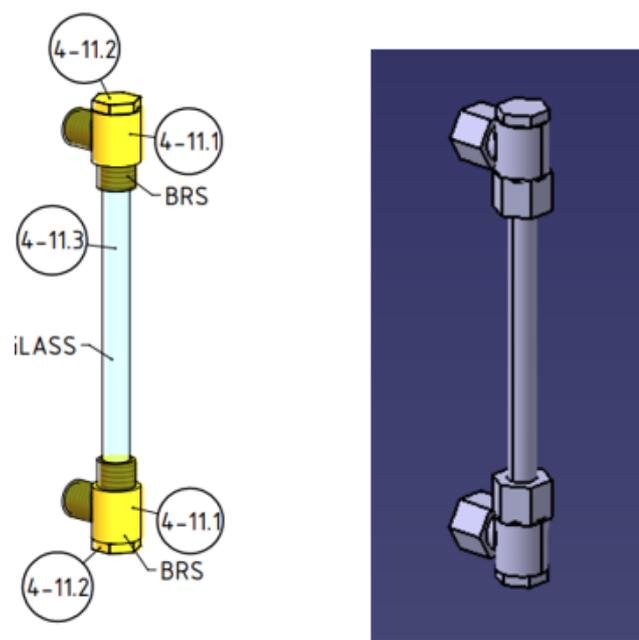


Figura 105. Esquema [1] y modelado de ls *water gauge* en CATIA V5

4.51 BRAZIL-4-12-WATER GAUGE PIPE NUT

El "water gauge pipe nut" es una tuerca utilizada para asegurar el tubo de vidrio del *water gauge* en su lugar. Este componente se encuentra en ambos extremos del tubo de vidrio y se utiliza para sujetarlo firmemente a las conexiones superiores e inferiores en la caldera, tal y como se puede apreciar en la Figura 106.

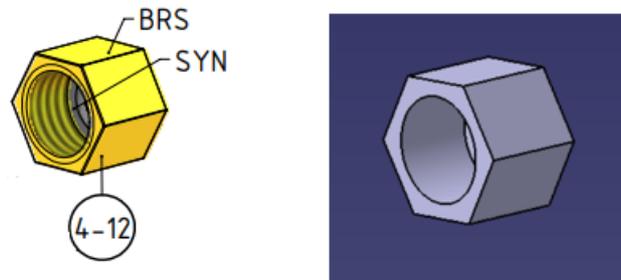


Figura 106. Esquema [1] y modelado de la *water gauge pipe nut* en CATIA V5

El proceso de modelado es exactamente igual que el descrito en el apartado 5.4 pero cambiando las dimensiones de la tuerca y el material, siendo latón en este caso.

4.52 BRAZIL-4-13-FIRE BOX

La "fire box" es el área ubicada en la parte trasera de la caldera. En esta parte se quema el combustible, generando calor que se transfiere al agua de la caldera para producir vapor. Está diseñada para soportar altas temperaturas y para contener de manera segura el fuego y los gases de combustión mientras se lleva a cabo el proceso de combustión.

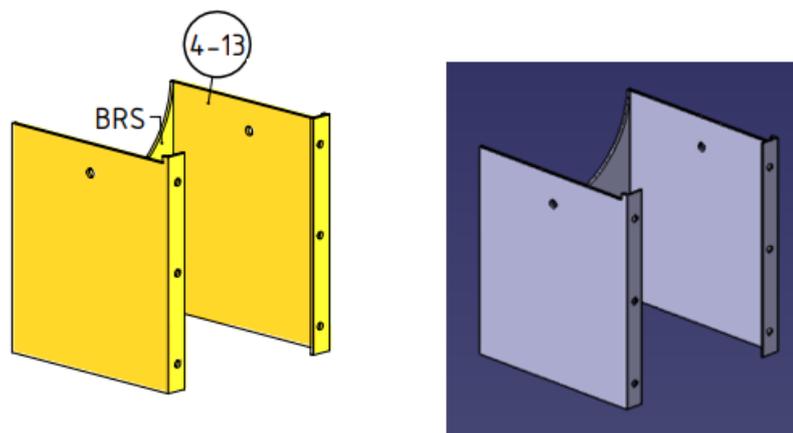


Figura 107. Esquema [1] y modelado de la *Fire box* en CATIA V5

Se modela en latón siguiendo los siguientes pasos:

1. En el plano vertical, se realiza el boceto de la pared fronal. La forma de esta se caracteriza por ser rectangular pero sustituyendo el lado corte superior por un semicírculo.
2. A continuación, se extruye el boceto con *Pad* para darle volumen a la pared.
3. En una de las caras del sólido generado, realizar un nuevo boceto de dos rectángulos verticales que representen la sección de las paredes laterales.

4. Extruir con *Pad* para generar las paredes.
5. Realizar de nuevo los pasos 3 y 4 en las caras verticales expuestas del sólido obtenido, pero aumentando la altura de los rectángulos la distancia necesaria.
6. Realizar el paso 5 aumentando hacia el interior de la caja la anchura de los rectángulos para crear los rebordes de unión.

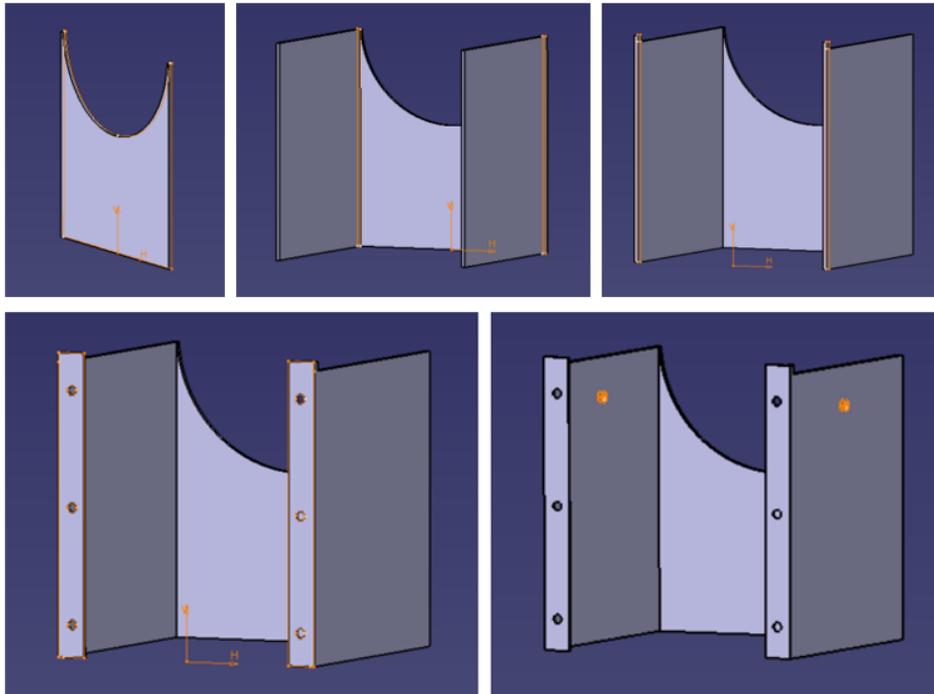


Figura 108. Proceso de modelado de la *Fire box* en CATIA V5

4.53 BRAZIL-4-14-DRY BACKHEAD

El "*dry backhead*" es una placa metálica colocada en la parte posterior de la cámara de combustión y la caldera, diseñada para proteger a los maquinistas del calor radiante y los gases de combustión. Esta placa metálica actúa como un escudo térmico, ayudando a reducir el riesgo de quemaduras para los maquinistas.

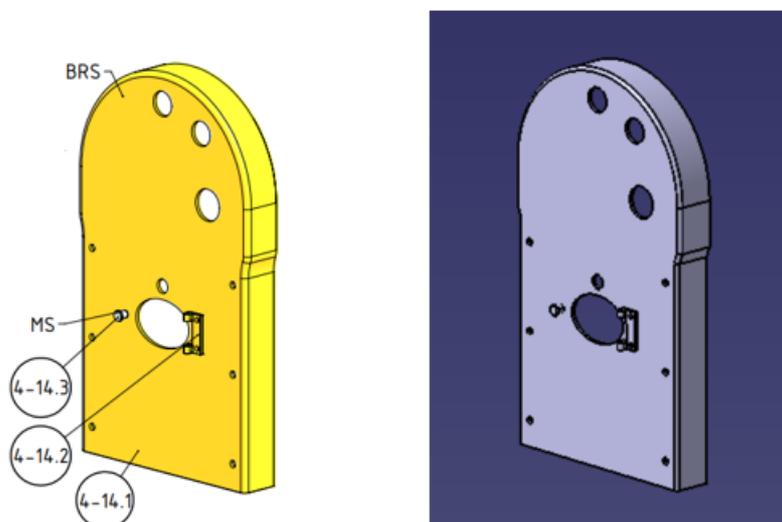


Figura 109. Esquema [1] y modelado de la *dry backhead* en CATIA V5

El proceso de modelado requiere las herramientas *Pad* y *Pocket*. En cuanto al material, este componente se modela en latón.

4.54 BRAZIL-4-15-CLACK VALVE

La "*clack valve*" es una válvula de retención utilizada para controlar el flujo de agua dentro de la caldera. Esta válvula es esencialmente una válvula unidireccional que permite que el agua fluya en una dirección mientras evita que fluya en la dirección opuesta, es decir, permite que el agua entre en la caldera desde el tanque de agua de la locomotora y evita que el agua regrese hacia el tanque cuando la presión de la caldera es mayor que la de este.

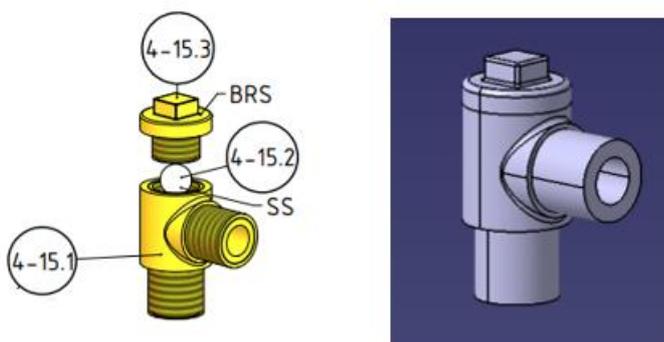


Figura 110. Esquema [1] y modelado de la *clack valve* en CATIA V5

El proceso de modelado requiere las herramientas *Pad* y *Shaft*. En cuanto a los materiales, todo el componente se modela en latón, excepto la bola interior (4-15.2) que se modela en acero.

4.55 BRAZIL-4-16-REGULATOR VALVE

La "*regulator valve*" es una válvula que controla el flujo de vapor hacia los cilindros. Está ubicada en la cabina del maquinista de manera que, al abrirla o cerrarla, se puede controlar la velocidad y la potencia de la locomotora.

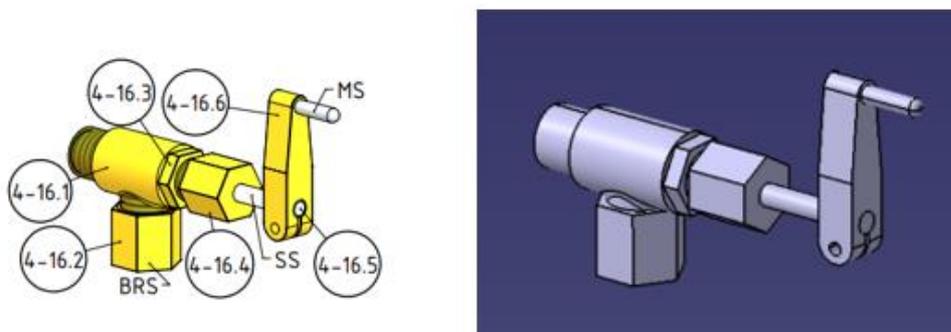


Figura 111. Esquema [1] y modelado de la *regulator valve* en CATIA V5

De manera semejante a la válvula anterior, se modela con las herramientas *Pad* y *Pocket*. En cuanto a los materiales, se emplea latón y acero.

4.56 BRAZIL-4-17-BLOWER VALVE

La "blower valve" es una válvula que se utiliza para liberar manualmente la presión de la caldera cuando es necesario, como durante una situación de emergencia o cuando se necesita realizar mantenimiento.

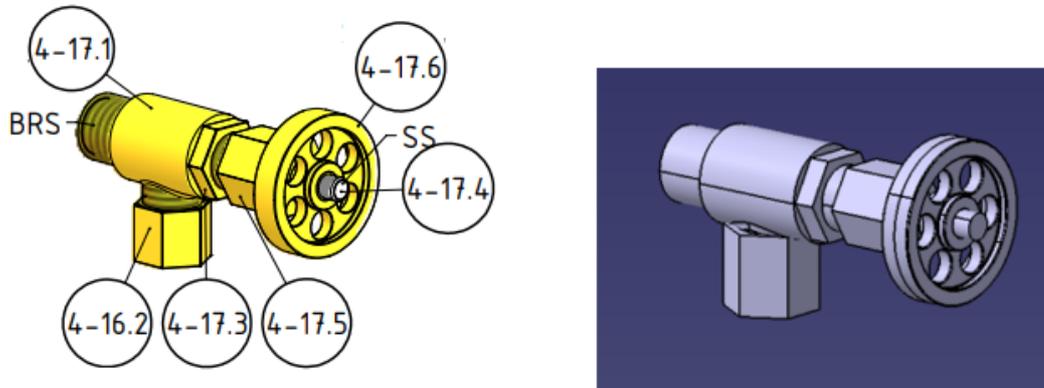


Figura 112. Esquema [1] y modelado de la *blower valve* en CATIA V5

Como en el resto de válvulas, se modela con las herramientas *Pad* y *Pocket*. En cuanto a los materiales, se emplea latón y acero.

4-17.6

Esta pieza es una rueda diseñada para ajustar manualmente la válvula. La rueda permite aplicar torque para controlar la válvula y ajustar su posición o apertura.

1. Se dibuja la media sección en forma de "I" (visto en la primera imagen), representando el semiperfil de la rueda. Utilizando la herramienta *Shaft*, se genera el sólido por revolución.
2. En un plano lateral interior, se dibujan los círculos y con la herramienta *Pocket* se realizan los agujeros.
3. Finalmente, se usa la herramienta *Fillet* para redondear los bordes y conseguir mayor comodidad para el operario.

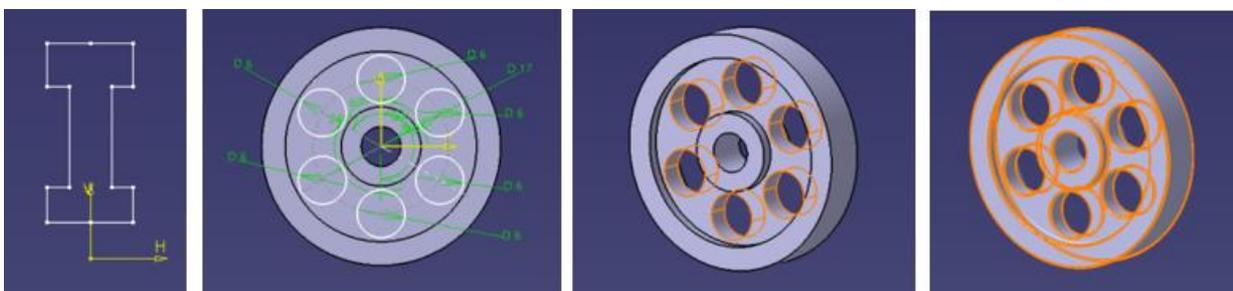


Figura 113. Proceso de modelado de la pieza 4-17.6 en CATIA V5

4.57 BRAZIL-4-18-BLOWER VALVE PIPING

El "blower valve piping" es el sistema de tuberías asociados a la *blower valve*. Está diseñado para dirigir el flujo de aire desde la "blower valve" hasta la tubería de escape, que lo conduce hacia la chimenea atravesando la caldera.

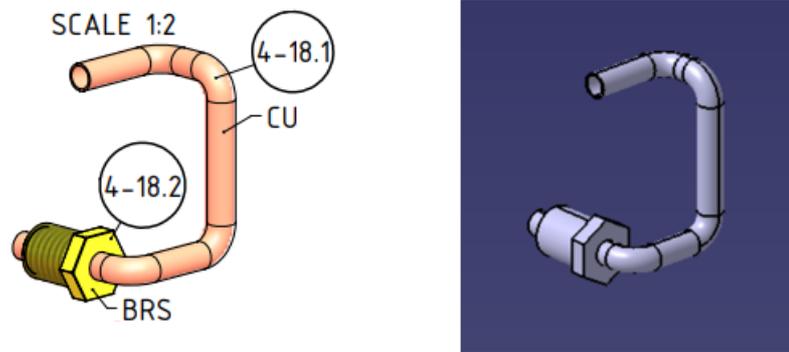


Figura 114. Esquema [1] y modelado de la *blower valve piping* en CATIA V5

4-18.1

Esta pieza es la tubería propiamente dicha. Se modela en cobre siguiendo los siguientes pasos, similares a los de la pieza 1-11.7 del apartado 5.11:

1. Se dibuja un boceto que representa la trayectoria de la tubería. Este boceto se realiza utilizando las herramientas *Line* y *Circle*, siendo necesario dividirlo en varios bocetos diferentes, según sea necesario cambiar de plano.
2. Se define la sección 2D de la tubería circular en un plano perpendicular al tramo inicial.
3. Con la trayectoria 2D definida, se aplica la herramienta *Rib* seleccionando la sección y la trayectoria, generando una forma tubular con la forma deseada. Este paso se realiza tantas veces como número de bocetos, o cambios de plano, compongan la trayectoria.

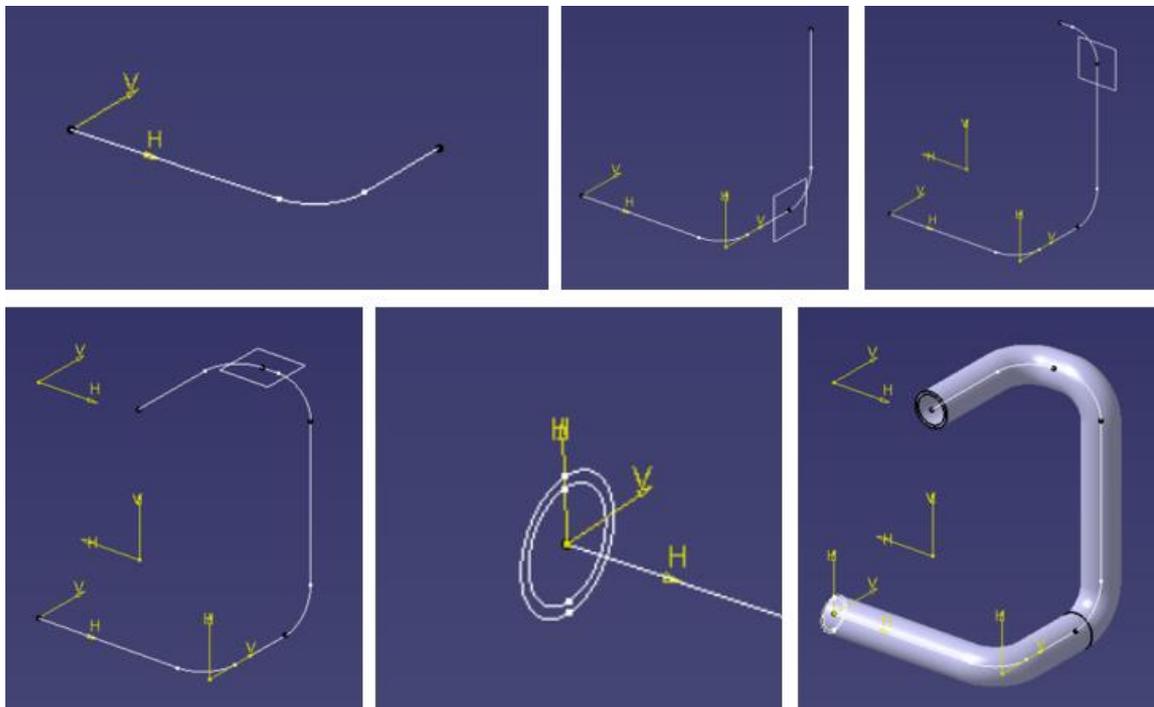


Figura 115. Proceso de moleado de la pieza 4-18.1 en CATIA V5

4.58 BRAZIL-4-19-BACKHEAD FIRE DOOR

La "*backhead fire door*" es una puerta ubicada en la parte trasera de la caldera, específicamente en el área de la caja de fuego. Esta puerta proporciona acceso al interior de la caja de fuego, permitiendo al personal de mantenimiento inspeccionar y limpiar la cámara de combustión, así como encender y mantener el fuego durante la operación de la locomotora. Está asegurada con un mecanismo de cierre para garantizar que permanezca cerrada durante el funcionamiento normal de la locomotora, pero pueda abrirse fácilmente cuando sea necesario.

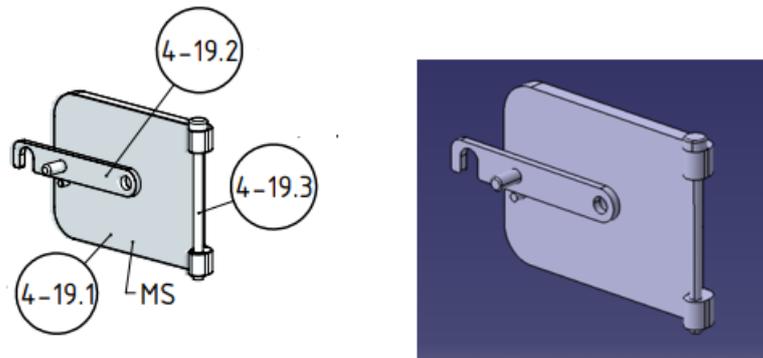


Figura 116. Esquema [1] y modelado de la *backhead fire door* en CATIA V5

Todas sus piezas se modelan en acero con la función *Pad*.

4.59 BRAZIL-4-20-STEAM SUPPLY PIPE

La "*steam supply pipe*" es una tubería que transporta vapor desde la caldera hacia los cilindros, donde se utiliza para impulsar los pistones y, a su vez, proporcionar la fuerza motriz necesaria para mover la locomotora. Está diseñada para soportar las altas temperaturas y presiones del vapor y está conectada directamente a la caldera en un extremo y a los cilindros en el otro.

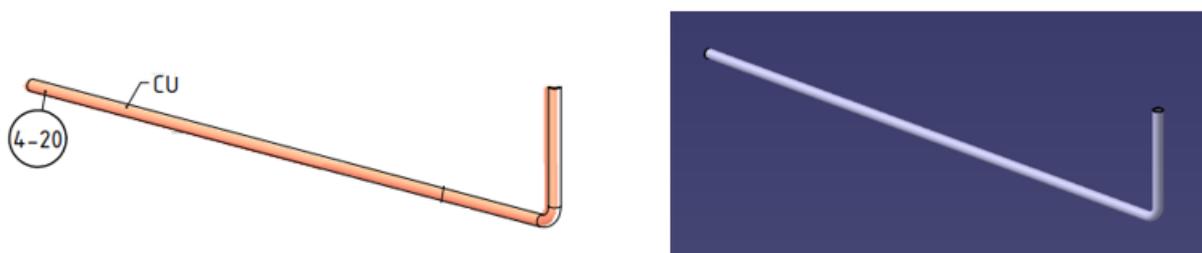


Figura 117. Esquema [1] y modelado de la *steam supply pipe* en CATIA V5

Se modela en cobre con la herramienta *Rib*.

4.60 BRAZIL-4-21-STEAM SUPPLY MANIFOLD

El "*steam supply manifold*" es una especie de colector que recibe vapor de la caldera a través de una *steam supply pipe* y lo desvía hacia los cilindros.

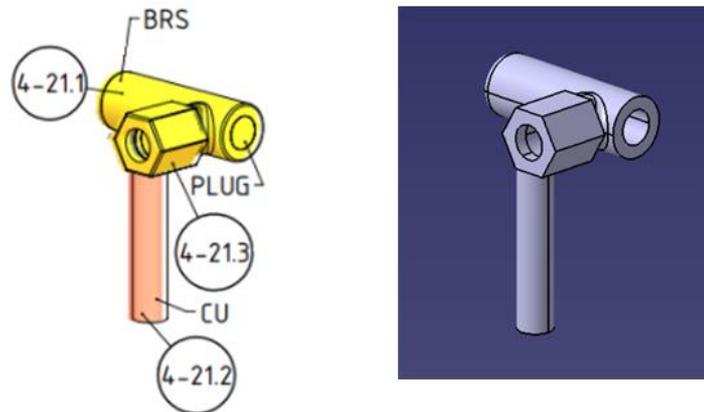


Figura 118. Esquema [1] y modelado de la *steam supply manifold* en CATIA V5

Las piezas que lo componen se modelan en latón y cobre de manera sencilla con las herramientas *Pad* y *Pocket*.

4.61 BRAZIL-4-23-PRESSURE GAUGE

El "*pressure gauge*" es un instrumento utilizado para medir la presión del vapor en la caldera. Está montado en un lugar visible en la cabina del maquinista para que pueda ser fácilmente observado. Muestra la presión del vapor en una escala graduada, permitiendo al maquinista conocer en todo momento la presión de trabajo.

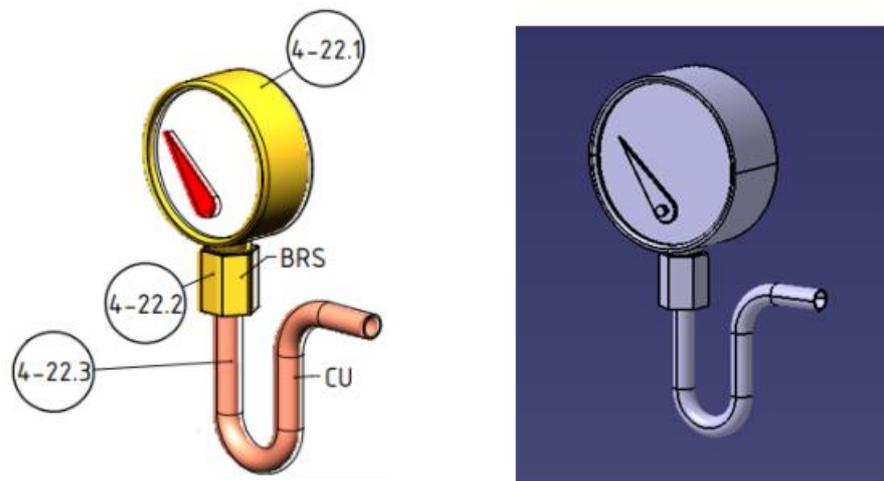


Figura 119. Esquema [1] y modelado de la *pressure gauge* en CATIA V5

Los materiales empleados son latón y cobre, siendo este último el utilizado en la tubería que permite la llegada del vapor. Dicha tubería se modela igual que la comentada en el apartado 5.18, cambiando su perfil y dimensiones. Para el resto de piezas, basta con el uso de las herramientas *Pad* y *Pocket*.

4.62 BRAZIL-5-01-SADDLE TANK SHELL

El "*saddle tank shell*" es la estructura exterior que forma el depósito de agua. Este tanque se encuentra ubicado sobre la caldera y se construye con materiales resistentes, formando una cubierta protectora que ayuda a mantener el agua segura y protegida contra elementos externos como el polvo, la suciedad y la intemperie.

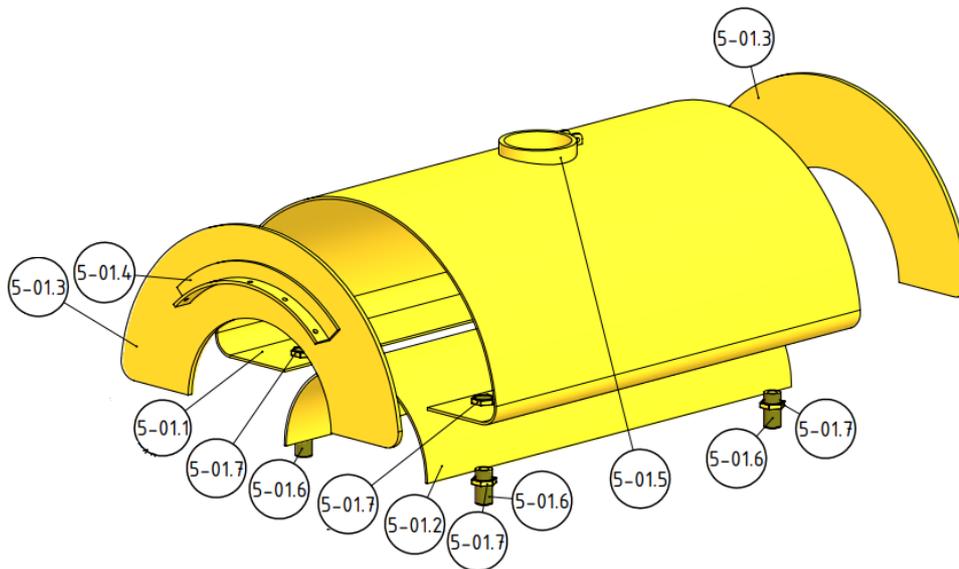


Figura 120. Esquema de la *saddle tank shell* [1]

Se modela al completo en latón con las herramientas *Pad*, *Pocket*, *Rib* y *Plane*. Como ejemplo, a continuación se define el proceso de modelado de una de las piezas que requiere el uso de las cuatro herramientas anteriormente mencionadas.

5-01.4

Esta pieza es una escuadra curva que, soldada al tanque, permite la unión de este a la superficie superior de la *smokebox shell* mediante remaches. El proceso de modelado es el siguiente:

1. En cualquier plano, se dibuja la curva que sigue longitudinalmente la escuadra.
2. A continuación, se crea un nuevo plano perpendicular en uno de los extremos de la curva, con la herramienta *Plane*.
3. Sobre este plano, se dibuja la forma en "L" característica de la sección de la escuadra.
4. Con la herramienta *Rib*, se extruye la sección a lo largo de la curva inicial.
5. Seguidamente, con la ayuda de la herramienta *Line*, se crean con *Plane* 4 nuevos planos para la creación de las perforaciones sobre la superficie curva.
6. Finalmente, se dibujan circunferencias sobre estos planos y el vertical, y con la herramienta *Pocket* se extrae el material, dando lugar a las 5 perforaciones sobre la escuadra.

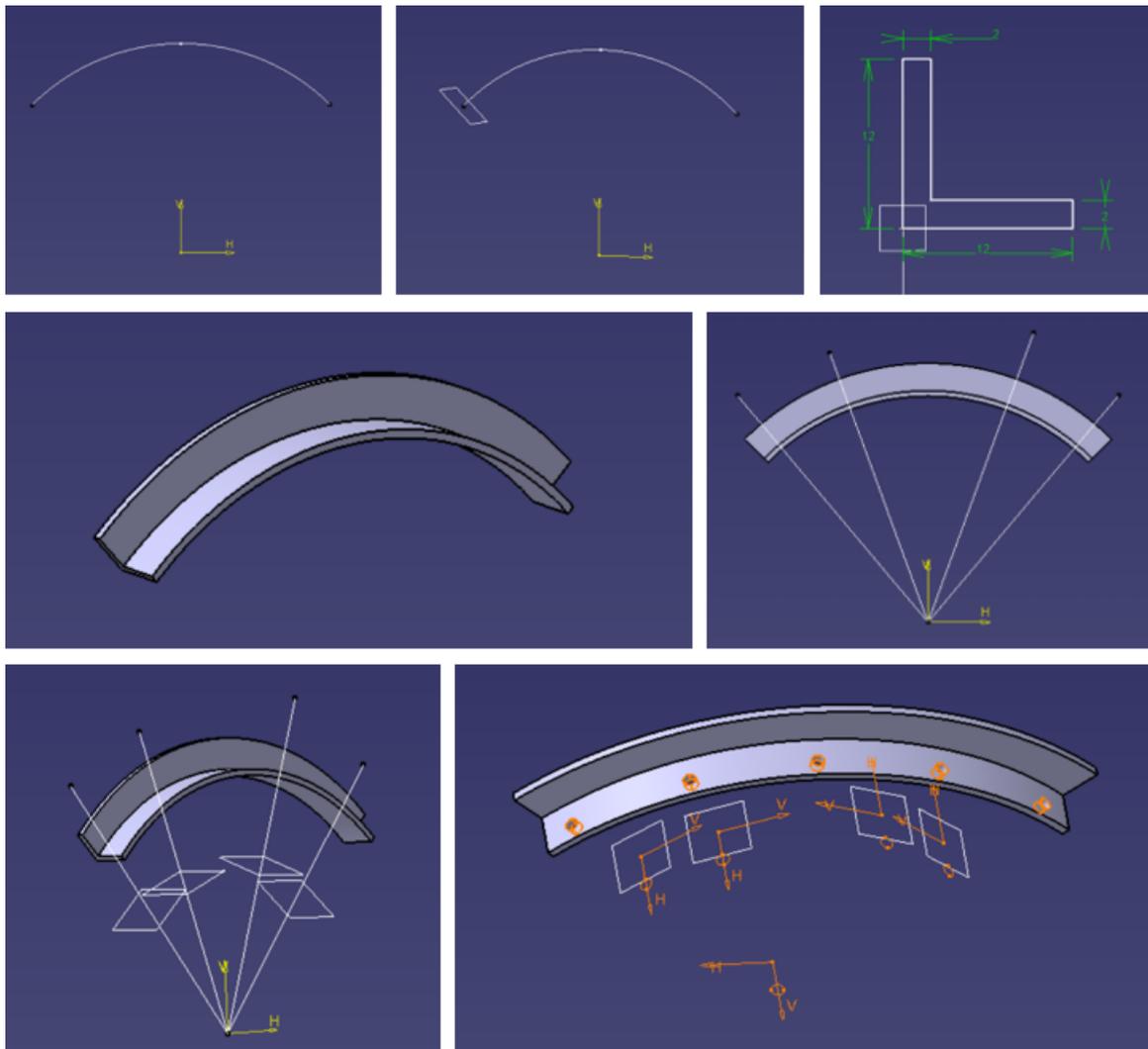


Figura 121. Proceso de modelado de la pieza 5-01.4 en CATIA V5

En la Figura 122, se muestra el *saddle tank shell* modelado al completo.

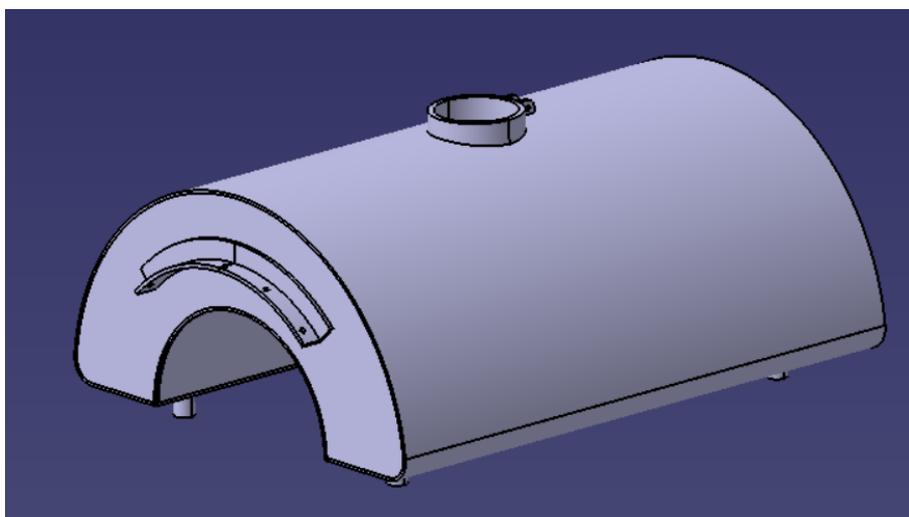


Figura 122. Modelado de la *saddle tank shell* en CATIA V5

4.63 BRAZIL-5-02-SADDLE TANK FILLER CAP

El "*saddle tank filler cap*" es la tapa que se utiliza para cerrar la abertura de llenado del tanque de agua. Esta tapa se encuentra ubicada en la parte superior del tanque.

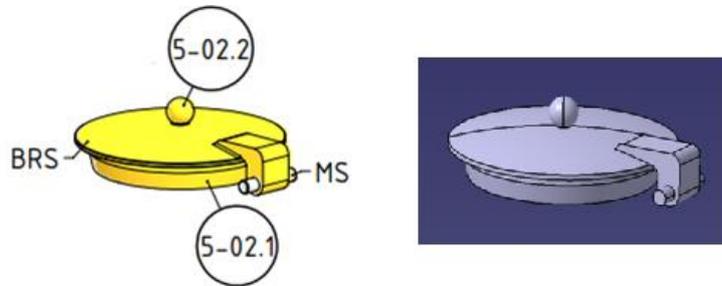


Figura 123. Esquema [1] y modelado de la *saddle tank filler cap* en CATIA V5

El proceso de modelado es semejante al expuesto en el apartado 5.29, empleándose en este caso latón y acero.

4.64 BRAZIL-5-03-SADDLE TANK BALANCING PIPE

La "*saddle tank balancing pipe*" es una tubería que se utiliza en locomotoras de vapor con depósito de agua tipo *saddle tank*, diseñada para conectar los dos tanques laterales del depósito de agua, equilibrando así el nivel de agua entre ambos. Esto es crucial para garantizar una distribución adecuada del peso y una tracción constante durante la operación.

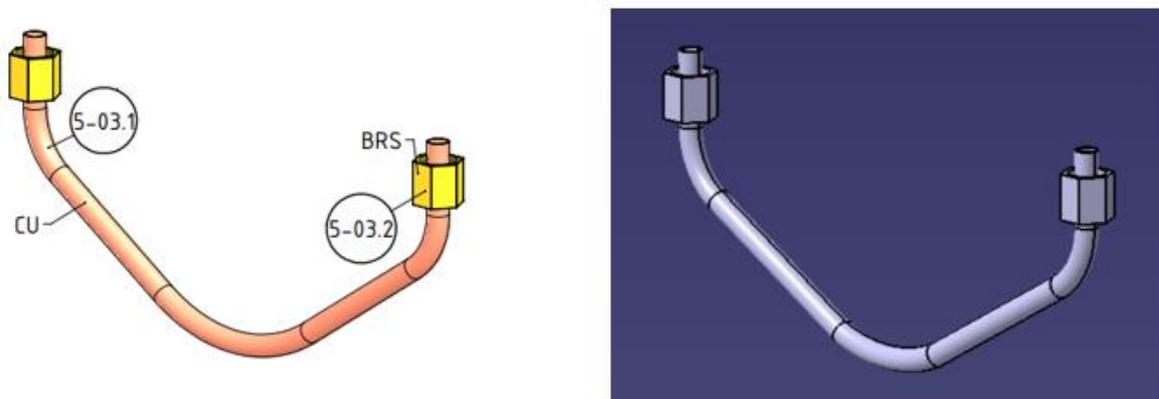


Figura 124. Esquema [1] y modelado de la *saddle tank balancing pipe* en CATIA V5

Como viene siendo típico, la tubería se modela en cobre y los elementos de unión en latón.

4.65 BRAZIL-5-04-SADDLE TANK STOP NUT

El "*saddle tank stop nut*" es una tuerca que se utiliza para asegurar el tanque de agua en su lugar en este tipo de locomotoras con depósito de agua tipo "*saddle tank*". Este componente se coloca en el extremo de los pernos

de montaje del tanque de agua y se aprieta contra la estructura de la locomotora para mantener el tanque en una posición fija y estable durante la operación.



Figura 125. Esquema [1] y modelado de la *saddle tank stop nut* en CATIA V5

El proceso de modelado es el mismo que el anteriormente expuesto para tuercas de este tipo.

4.66 BRAZIL-5-05-DRIVERS CAB SIDE FRAME

El "*drivers cab side frame*" es la estructura que forma la parte lateral y frontal de la cabina. Esta parte del chasis proporciona soporte y protección al maquinista, y dejando el hueco suficiente para permitir la visibilidad.

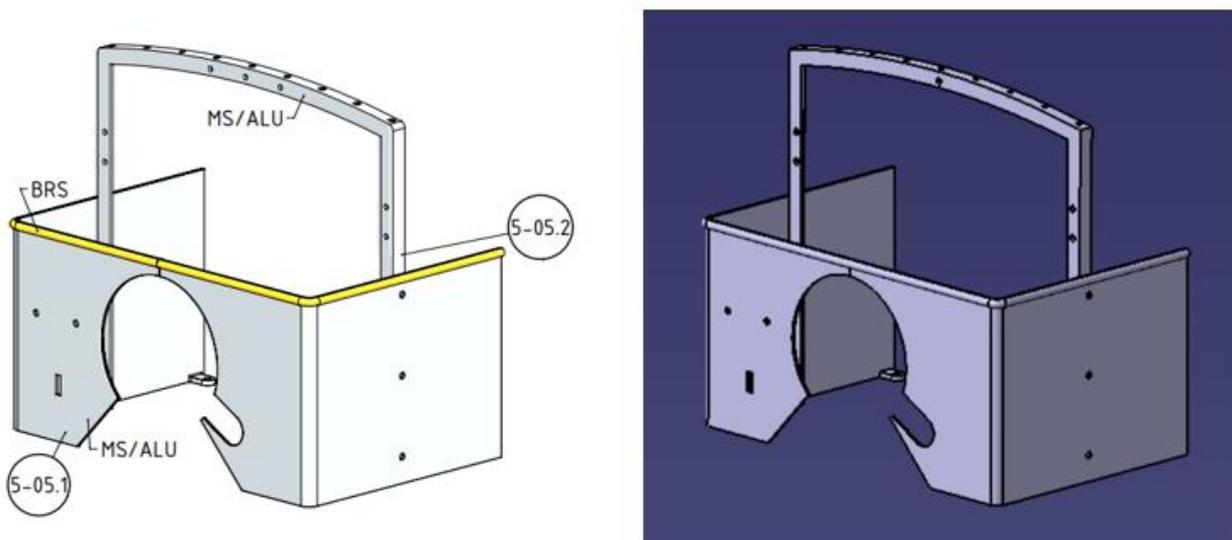


Figura 126. Esquema [1] y modelado del *drivers cab side frame* en CATIA V5

Este componente de la locomotora se modela en acero, excepto el borde superior de la pieza 5-05.1 que se modela en latón simplemente por estética. Las herramientas utilizadas son *Pad*, *Pocket* y *Rib*.

4.67 BRAZIL-5-06-DRIVERS CAB BUNKER

El "*drivers cab bunker*" es una especie de estantería dedicada al área de almacenamiento. Se ubica en la cabina del maquinista y se utiliza para almacenar herramientas, suministros u otros equipos que puedan ser necesarios

durante el viaje o la operación de la locomotora. Está diseñado para proporcionar un acceso conveniente a los artículos almacenados.

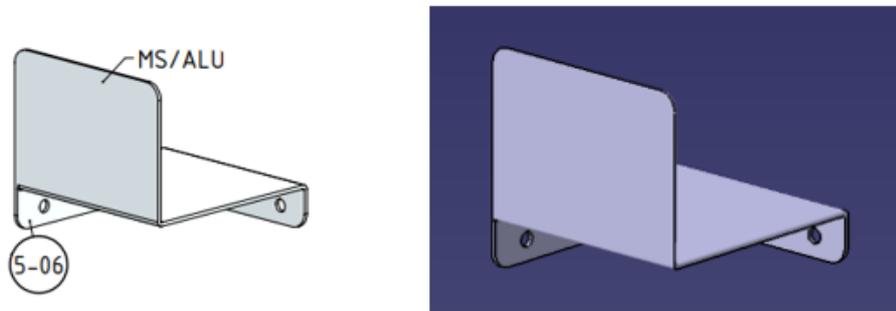


Figura 127. Esquema [1] y modelado del *drivers cab bunker* en CATIA V5

Este componente de la locomotora se modela en acero con la herramienta *Pad* y *Pocket*.

4.68 BRAZIL-5-07-DRIVERS CAB FRONT PLATE

El "*drivers cab front plate*" es una placa ubicada en la parte frontal de la cabina del maquinista. Esta placa proporciona protección contra el viento y otros elementos externos, ayudando a mantener al maquinista resguardado mientras opera.

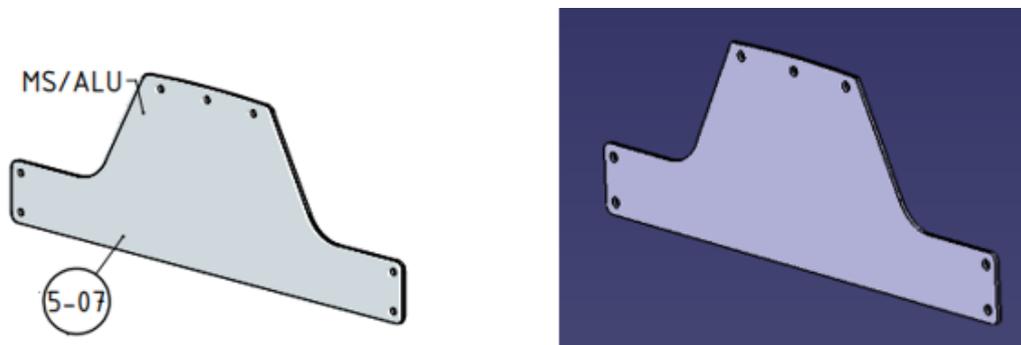


Figura 128. Esquema [1] y modelado del *drivers cab front plate* en CATIA V5

Esta placa se modela en acero fácilmente con la herramienta *Pad*.

4.69 BRAZIL-5-08-DRIVERS CAB REAR FRAME

El "*drivers cab rear frame*" es la estructura ubicada en la parte trasera de la cabina. Esta parte del chasis proporciona soporte y protección adicional al habitáculo del conductor. Además, puede servir como punto de montaje para diversos componentes, como luces traseras, reflectores u otros dispositivos de señalización necesarios para la visibilidad y seguridad durante la operación de la locomotora.

Este componente se modela en su totalidad con la herramienta *Pad* y *Pocket*, y se emplea acero como material de fabricación.

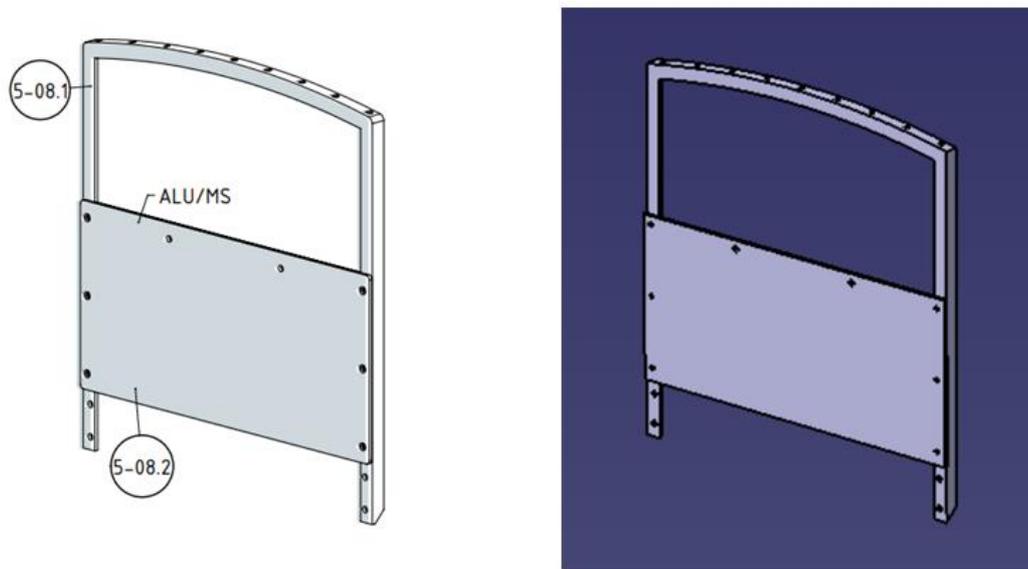


Figura 129. Esquema [1] y modelado del *drivers cab rear frame* en CATIA V5

4.70 BRAZIL-5-09-DRIVERS CAB ROOF

El "*drivers cab roof*" es la parte superior o cubierta de la cabina. Esta estructura está diseñada para proteger al maquinista de las inclemencias del tiempo, como la lluvia, la nieve, el sol y el viento, proporcionando un ambiente de trabajo más cómodo y seguro.

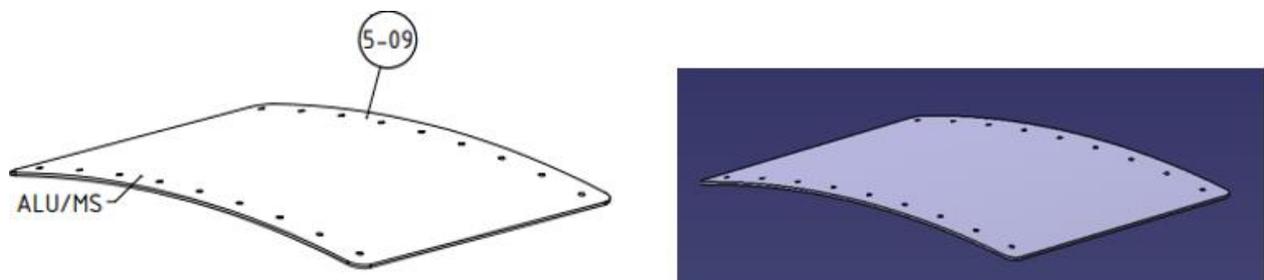


Figura 130. Esquema [1] y modelado del *drivers cab roof* en CATIA V5

La cubierta se modela en acero, al igual que el resto de la estructura, siguiendo los siguientes pasos:

1. Se realiza el boceto del perfil curvo de la placa.
2. Con *Pad*, se extruye para crear el sólido.
3. Con la herramienta *Fillet*, se redondean las 4 esquinas.
4. Sobre la placa, se realiza el boceto de las perforaciones. En este caso, a pesar de la curvatura, todas las perforaciones se han realizado verticalmente, evitando así la necesidad de crear un plano para cada par de perforaciones.
5. Finalmente, se extrae el material con *Pocket*.

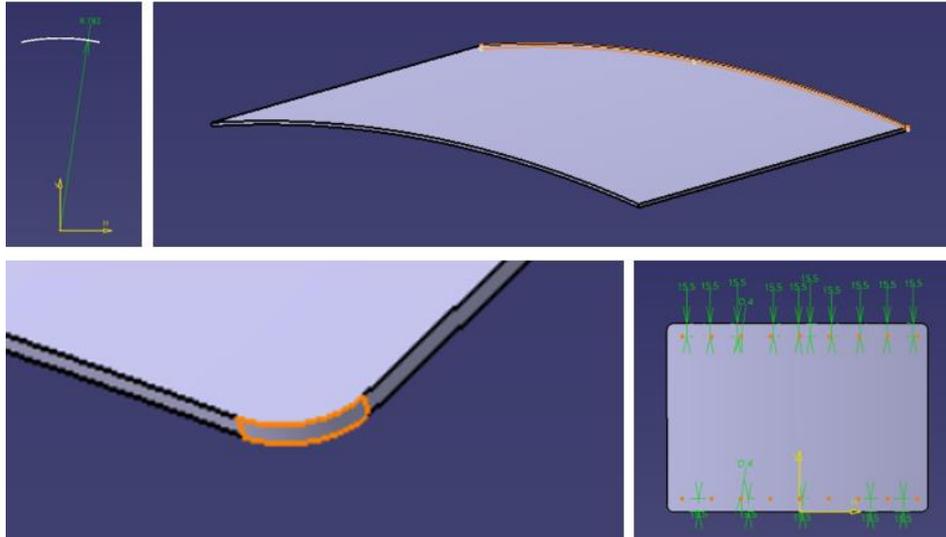


Figura 131. Proceso de modelado del *drivers cab roof* en CATIA V5

4.71 BRAZIL-89mm-RAIL

El término "*BRAZIL-89mm-RAIL*" es un tipo específico de riel utilizado en el sistema ferroviario en Brasil, con una anchura de 89 milímetros. Este tipo de riel puede ser utilizado en ferrocarriles industriales, tranvías o líneas de ferrocarril de vía estrecha.

Los planos del modelo con el que se ha trabajado no proporciona la forma y dimensiones de la vía. Por este motivo, se ha diseñado la sección del riel en función de la forma de las ruedas de la locomotora y del ancho de vía, y se ha escogido una distancia conveniente entre los travesaños de madera. Estas decisiones de diseño se pueden observar en la Figura 132.

El modelado de la misma se ha llevado a cabo de manera sencilla con las herramientas *Pad*, *Fillet* y *Translate*. Esta última permite duplicar un elemento en una dirección equispaciadamente el número de veces que deseemos, lo que ha facilitado la creación de los travesaños.

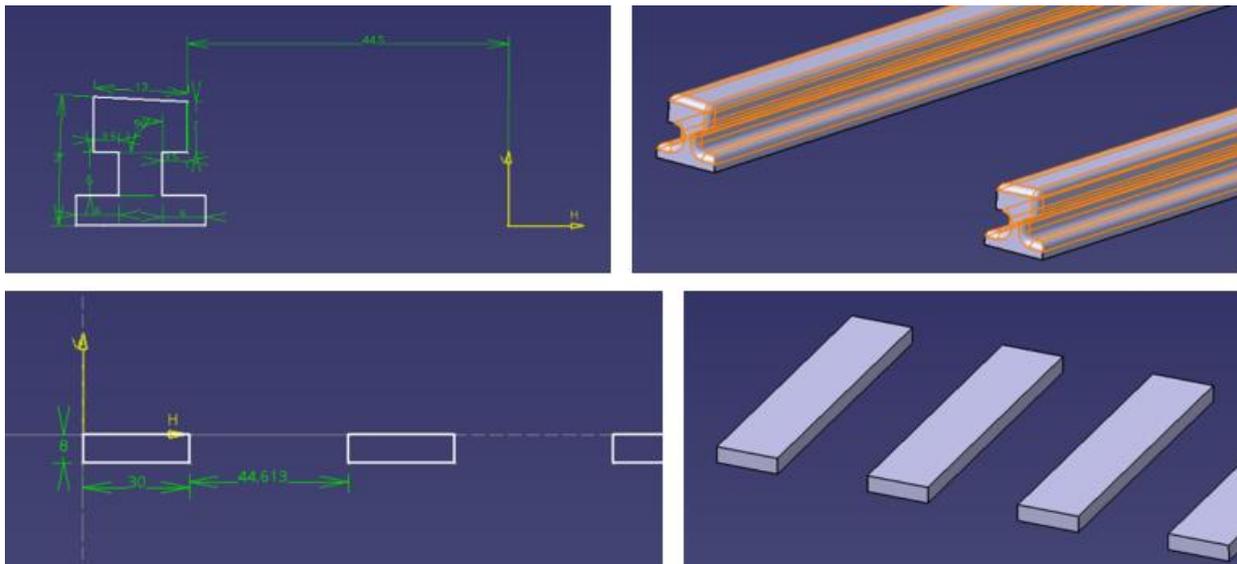


Figura 132. Proceso de modelado de la vía en CATIA V5

Se han escogido materiales realistas como son el hierro (*Iron*) para los rieles, y la madera de roble (*Oak*) para

los travesaños, siendo esta típica por su durabilidad y resistencia.

Como ya se introdujo anteriormente, en el siguiente apartado se presentarán los diseños propios realizados específicamente para completar el modelo. Estos diseños han sido creados y adaptados conforme a los requisitos técnicos del proyecto, con el objetivo de asegurar la funcionalidad y precisión de cada componente.

4.72 Diseños propios: Foco delantero y Mecanismo silbato

A pesar de que los planos originales del modelo son bastante correctos en su mayoría, se ha identificado la presencia de ciertos errores que han tenido que ser subsanados durante el proceso de modelado. Además, los planos se encuentran incompletos, lo que ha requerido una investigación más profunda. Tras comparar con imágenes reales y estudiar los mecanismos de las antiguas locomotoras, se ha decidido diseñar dos componentes clave que faltaban: un foco delantero y el mecanismo silbato, ambos esenciales para completar de manera fiel y funcional el modelo.

Cabe destacar que para la identificación de las nuevas piezas se ha seguido la misma codificación numérica usada hasta ahora, dando lugar al bloque 6.

4.72.1 BRAZIL-6-01-FOCUS

El diseño del foco está constituido por las 5 piezas que se muestran a continuación:

6-01.1

Esta pieza es una escuadra curva con sección en T, diseñada para permitir la sujeción del foco a la caja de humos mediante remaches. Su modelado se ha realizado utilizando las herramientas *Pad*, *Pocket* y *Fillet*, optando por el aluminio como material de fabricación, con el objetivo de minimizar el peso total del modelo sin comprometer su resistencia estructural.

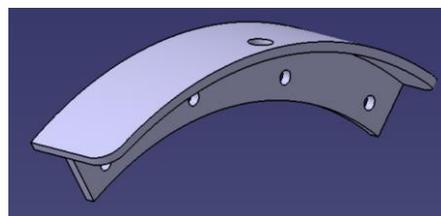


Figura 133. Pieza 6-01.1 modelada

6-01.2

Esta pieza es un soporte en forma de U que sostiene el foco y permite su fijación a la escuadra, posibilitando tanto el giro vertical como horizontal del foco, lo que permite apuntarlo manualmente en la dirección deseada. Al igual que la pieza anterior, el modelado en aluminio de la pieza se ha realizado mediante *Pad*, *Pocket* y *Fillet*.



Figura 134. Pieza 6-01.2 modelada

6-01.3

La carcasa del foco facilita el encaje con el soporte y permite colocar una bombilla. Esta pieza se modela utilizando las operaciones *Shaft* y *Fillet*, lo que asegura una forma cóncava precisa. Al igual que las otras partes, se emplea aluminio para mantener la ligereza del conjunto sin comprometer la robustez o funcionalidad del diseño.

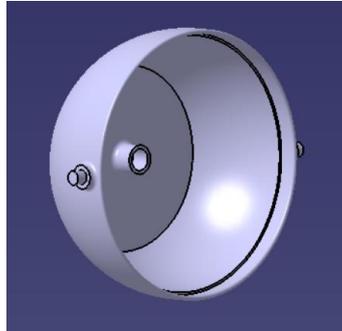


Figura 135. Pieza 6-01.3 modelada

6-01.4

La bombilla se modela utilizando las operaciones *Shaft*, *Pocket* y *Fillet*, lo que permite crear su forma esférica. Para este componente, se elige el vidrio (glass) como material, lo que simula su apariencia y propiedades, contribuyendo así a la representación realista del foco en el modelo. Esta elección de material es esencial para reflejar adecuadamente el diseño estético de la bombilla.

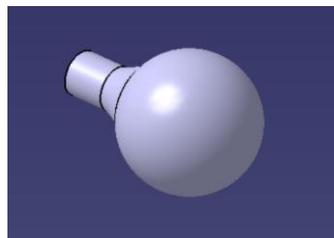


Figura 136. Pieza 6-01.4 modelada

6-01.5

La cubierta del foco se modela en *plexiglass*, un material transparente que ofrece buena resistencia y claridad óptica. Para su modelado, se dibuja media sección y se utiliza la operación *Shaft*, lo que permite crear la forma adecuada que encaja sobre la carcasa y proporciona una protección eficaz. Este material no solo permite la difusión de la luz, sino que también agrega un acabado estético al conjunto del foco.

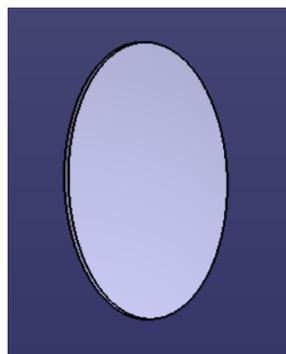


Figura 137. Pieza 6-01.5 modelada

Finalmente, en la Figura 138, se muestra el foco completo.



Figura 138. Foco modelado y ensamblado en CATIA V5

4.72.2 BRAZIL-6-02-WHISTLE

El diseño del mecanismo silbato está constituido por las 10 piezas que se muestran a continuación:

6-02.1

Esta pieza es el soporte base del silbato, que permite unir el mecanismo a la *safety valve dome* (apartado 5.49). Está diseñada para fijar el conjunto del silbato a la locomotora, garantizando estabilidad. Se ha modelado en aluminio utilizando las herramientas *Pad*, *Pocket* y *Fillet* para asegurar un diseño funcional y ligero.

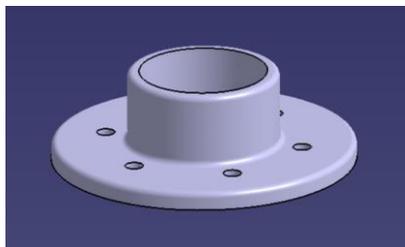


Figura 139. Pieza 6-02.1 modelada

6-02.2

Esta pieza es un conducto tubular que actúa como chimenea, dirigiendo el vapor de escape hacia arriba para evitar obstruir la visibilidad del maquinista. Se ha modelado en latón para mantener la estética del modelo de la locomotora, utilizando las herramientas *Pad* y *Fillet* para darle su forma final.

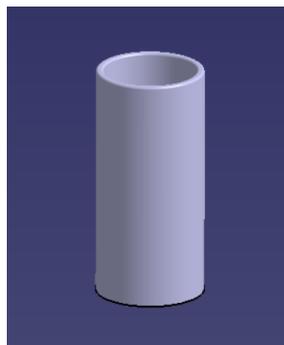


Figura 140. Pieza 6-02.2 modelada

6-02.3

Esta pieza es un pie de apoyo que sostiene el apoyo central del sistema de palanca, el cual permite la activación del mecanismo del silbato. Se ha modelado en aluminio empleando las herramientas *Pad* y *Fillet* para dar forma y suavizar los bordes de la pieza.



Figura 141. Pieza 6-02.3 modelada

6-02.4

Esta pieza es un elemento que se coloca sobre el soporte anterior. Su función es permitir que la palanca se apoye y pueda girar durante la activación del silbato. Se ha modelado en aluminio utilizando las herramientas *Pad*, *Pocket* y *Fillet*, lo que permite una estructura sólida y bordes suavizados.

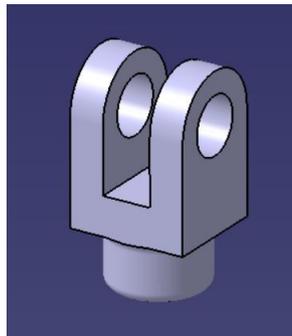


Figura 142. Pieza 6-02.4 modelada

6-02.5

En este caso, se trata de una pieza semejante a la anterior. La diferencia está en que esta se coloca sobre la pieza 4-09.3 de la *safety valve* (apartado 5.48) que, como se comentó durante su descripción, fue alargada para facilitar el correcto funcionamiento del mecanismo. Su función es la misma, unir dos piezas dejando libre un grado de libertad.

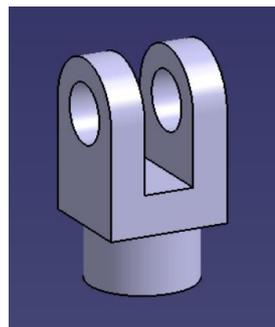


Figura 143. Pieza 6-02.5 modelada

6-02.6

La palanca es la pieza encargada de transmitir el movimiento que ejecuta el maquinista hacia la *safety valve*, activando el mecanismo del silbato. Está modelada en aluminio para garantizar ligereza y resistencia, y se ha construido utilizando las herramientas *Pad* y *Fillet*, proporcionando una forma definida y bordes suavizados en los pines de unión

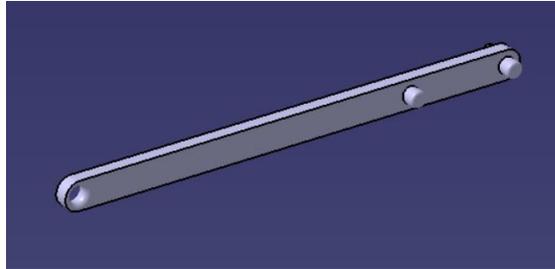


Figura 144. Pieza 6-02.6 modelada

6-02.7

La varilla es una pieza que se conecta al extremo de la palanca y es desde donde el maquinista ejerce la fuerza para activar el mecanismo del silbato. Está modelada en aluminio, empleando las herramientas *Pad*, *Shaft* y *Fillet* para darle su forma tubular y suavizar los bordes, facilitando así su manipulación y asegurando un movimiento fluido.



Figura 145. Pieza 6-02.7 modelada

6-02.8

La manilla es la pieza ubicada en el extremo de la varilla. Es la parte accesible al maquinista, diseñada ergonómicamente para permitir un agarre cómodo y eficiente al momento de tirar hacia abajo. Se modela en aluminio utilizando las herramientas *Pad* y *Fillet*.

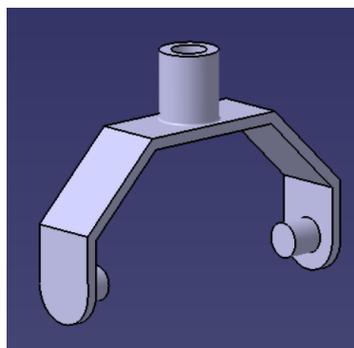


Figura 146. Pieza 6-02.8 modelada

6-02.9

El agarre, que se coloca en la manilla, es una pieza tubular de madera diseñada para proporcionar comodidad y facilitar el manejo por parte del maquinista. Esta pieza se modela utilizando la herramienta *Pad* empleando madera de roble, lo que no solo ofrece un buen tacto, sino que también contribuye al aspecto tradicional del modelo, manteniendo la coherencia con los materiales empleados en las locomotoras antiguas.

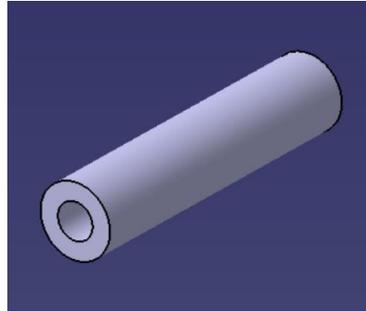


Figura 147. Pieza 6-02.9 modelada

6-02.10

Esta última pieza es similar a las 6-02.4 y 6-02.5, facilita la unión de piezas permitiendo el giro, en este caso, en ambos extremos. Se coloca el extremo libre de de la palanca y se une a la pieza 6-02.4. De esta manera, ya se tiene el mecanismo completamente cerrado y funcional. Se modela en aluminio usando *Pad*, *Pocket* y *Fillet*.

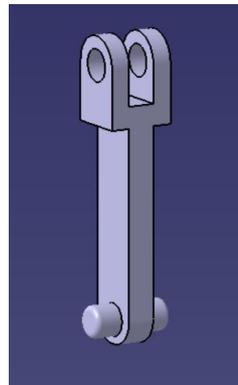


Figura 148. Pieza 6-02.10 modelada

Finalmente, en la Figura 149, se muestra el mecanismo silbato completo.

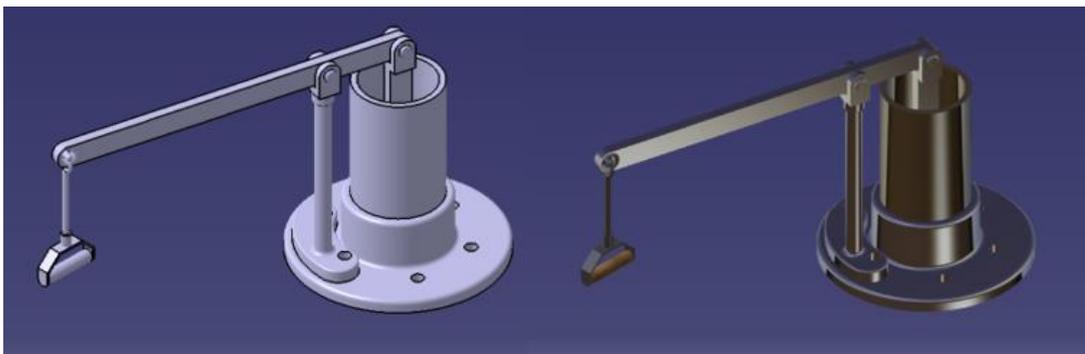


Figura 149. Mecanismo silbato modelado y ensamblado en CATIA V5

5 ENSAMBLE Y RENDERIZADO

En este capítulo se detallan los procesos de ensamblaje y renderizado de la locomotora de vapor, basados en los planos de la misma [1]. El análisis de estos ensamblajes es crucial para comprender la estructura y funcionamiento del sistema completo, así como para identificar las relaciones y dependencias entre sus componentes. Además, se presentarán los métodos y técnicas utilizados para renderizar los subconjuntos y el modelo final, proporcionando una visualización clara y realista.

5.1 Proceso Ensamblaje

El módulo que permite ensamblar las piezas es el siguiente:

Assembly Design Workbench

Para acceder al mismo, se busca *Mechanical Design* en el desplegable que aparece al clicar sobre la pestaña *Start*, situada en la barra superior de opciones. De esta manera accedemos a un nuevo desplegable, en el cual aparece el *workbench Assembly Design*, tal y como se muestra en la Figura 150.

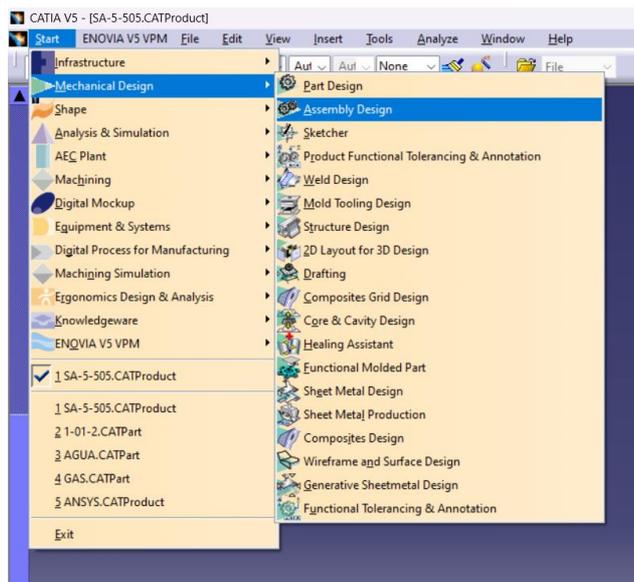


Figura 150. Ubicación de *Assembly Design* en la interfaz de usuario

Este módulo permite importar los modelos individuales de cada componente y organizarlos en un ensamblaje completo. Además, facilita la gestión de jerarquías de ensamblaje y sub-ensamblajes, permitiendo una estructura clara y organizada.

Una vez se accede al módulo y se importan las piezas a ensamblar, se requiere el uso de diversas herramientas:

Constraints (Restricciones)

Las restricciones son esenciales para definir cómo interactúan y se posicionan los componentes entre sí. A continuación, se definen las principales:

- Coincidencia: Alinea superficies o ejes de diferentes componentes.
- Concentricidad: Asegura que los ejes de dos componentes sean coaxiales.
- Distancia: Define una distancia fija entre superficies o ejes.

- Ángulo: Establece un ángulo específico entre planos o ejes.
- Fijación: Fija un elemento en el espacio.



Figura 151. Panel *Constraints*

En la Figura 151 se muestran las herramientas disponibles para colocar restricciones en el sistema. Las de coincidencia y concetricidad se consiguen con la primera opción, la de distancia con la tercera, la de ángulo con la cuarta y la de fijación con la quinta.

Estas restricciones se han aplicado para posicionar con precisión todas y cada una de las piezas que componen la máquina de vapor, así como los elementos de unión.

Manipulación y posicionamiento

Durante el ensamblaje, los componentes se han manipulado y posicionado utilizando herramientas como "*Translate*" y "*Rotate*", lo que permite ajustar la orientación y ubicación antes de aplicar las restricciones definitivas.



Figura 152. Panel *Manipulation*

Se debe destacar que, ha resultado de gran utilidad en todo momento usar estas opciones activando "*With respect to constraints*", tal y como se muestra en la Figura 152, para que los movimientos que deseemos realizar tengan en cuenta las restricciones impuestas. De esta manera, se ha podido comprobar por ejemplo si el movimiento del sistema de barras de transmisión es el correcto.

Actualización

Esta herramienta, cuyo símbolo se muestra en la Figura 153, actualiza el modelo una vez aplicadas las restricciones al sistema, lo que permite comprobar si las piezas encajan correctamente o si existen errores en el modelado.



Figura 153. Panel *Update*

5.2 Proceso Renderizado

Para obtener imágenes renderizadas, se ha hecho uso de la herramienta *Photo Studio Easy Tools*. Dicha herramienta se encuentra dentro del módulo de ensamblaje y tiene el símbolo que se muestra en la Figura 154.



Figura 154. Panel *Photo Studio Easy Tools*

Clicando sobre la misma permite:

- Aplicar una imagen de fondo, iluminación y sombreado. Controla la iluminación de la escena para crear efectos de luz y sombras realistas.

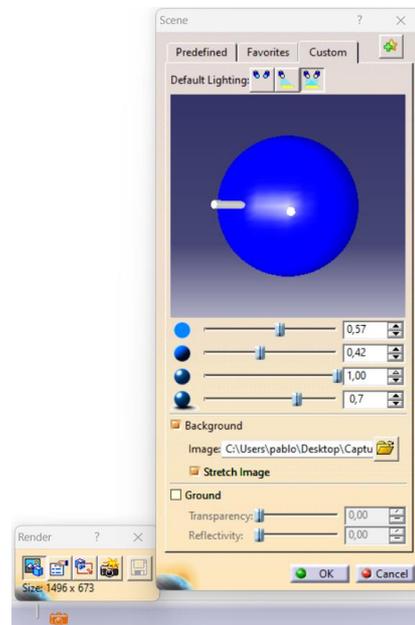


Figura 155. Panel de control de fondo, iluminación y sombreado

Se han configurado fuentes de luz en la escena para resaltar los detalles del modelo y crear un efecto visual atractivo.

- Cambiar la configuración de renderizado, como por ejemplo la resolución de la imagen.

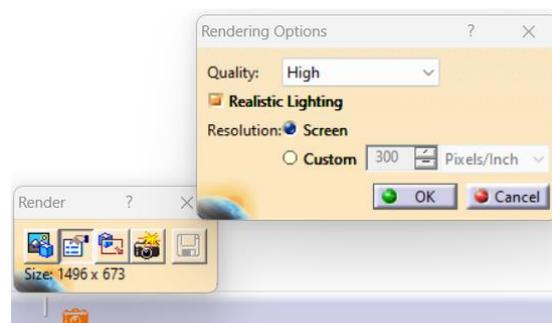


Figura 156. Panel de configuración de renderizado

- Delimitar el área a renderizar, lo que permite disminuir el tamaño del renderizado quedándonos únicamente con la zona de la pantalla en la que estemos interesados y evitando un sobreesfuerzo computacional.

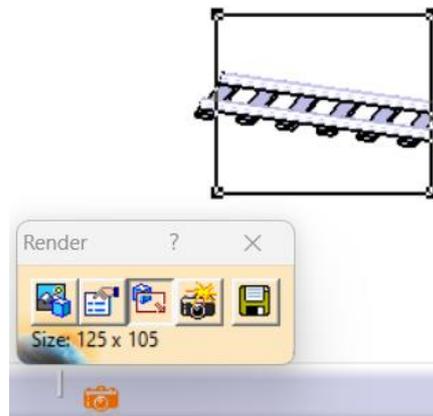


Figura 157. Opción para delimitación de área

- Renderizar creando imágenes detalladas.

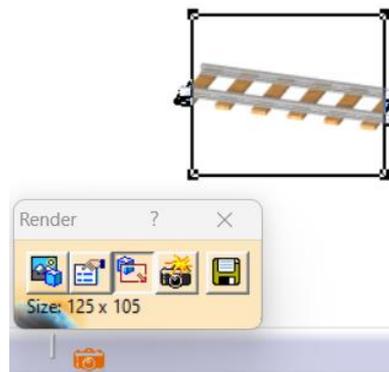


Figura 158. Opción renderizar

- La última opción permite guardar en el dispositivo la imagen renderizada.

5.3 Ensamblajes

A continuación, se recogen en orden los diferentes ensamblajes que componen la máquina de vapor, hasta llegar al modelo completo. Para cada uno, se explica de manera breve las características principales del conjunto y del proceso de ensamblado. Además, se muestra la imagen proporcionada en los planos [1] (en las cuales se indica la parte numérica del *part number* de cada subconjunto, recogido en el capítulo anterior) y la del conjunto final renderizado, permitiendo así la comparación y detección de diferencias, si las hubiera.

Debido a la gran cantidad de elementos con los que se trata y a la semejanza en el proceso de ensamblado de cada uno de ellos, la explicación del proceso puede resultar repetitiva. Por este motivo, se comentará a rasgos generales, hacienda incapié en las características más importantes.

5.3.1 SA-1-101

Este conjunto corresponde a la estructura del cilindro izquierdo de la máquina de vapor. Contiene el cilindro propiamente dicho, el compartimento de la válvula deslizante y la barra guía para el pistón.

El proceso de ensamblado destaca por su sencillez, ya que se basa en uniones atornilladas, al igual que en el resto de conjuntos como veremos más adelante. Únicamente se han utilizado las restricciones de fijación para fijar en el espacio el cilindro, de concentricidad para alinear las perforaciones de los componentes y coincidencia para establecer superficies de contacto entre dichos componentes.

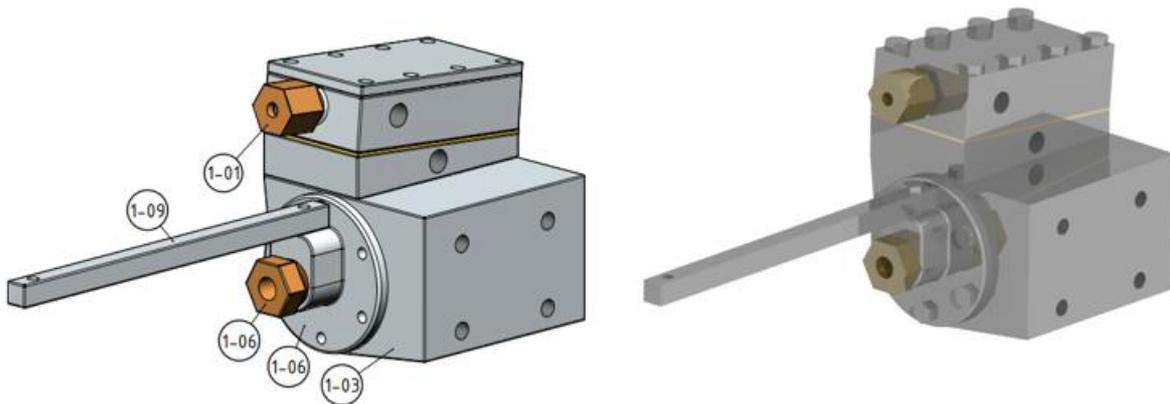


Figura 159. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-1-101

5.3.2 SA-1-102

Este conjunto corresponde a la estructura del cilindro derecho de la máquina de vapor. Contiene el cilindro propiamente dicho, el compartimento de la válvula deslizante y la barra guía para el pistón, al igual que el izquierdo.

En proceso de ensamblado es exactamente igual que en el caso anterior.

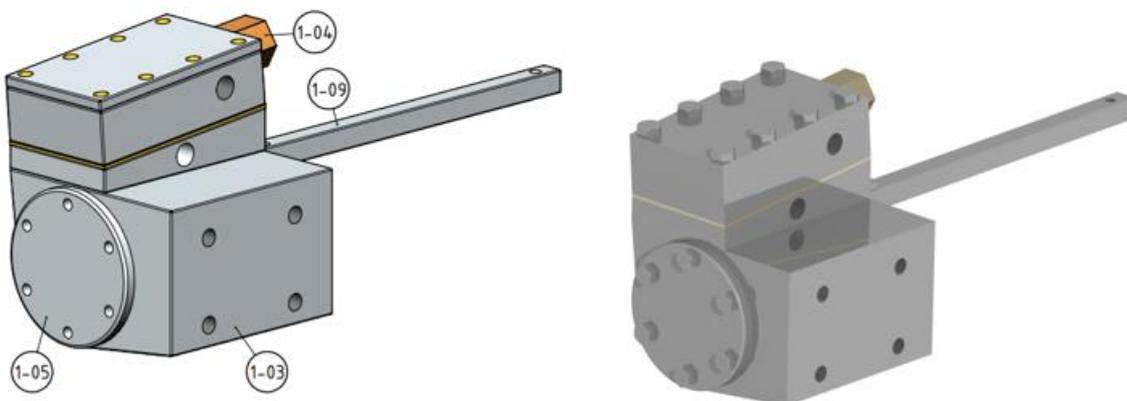


Figura 160. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-1-102

5.3.3 SA-1-105

El ensamblaje SA-1-105 es un subconjunto importante de la locomotora de vapor. Este ensamblaje incluye varios componentes críticos que trabajan juntos para asegurar el funcionamiento adecuado del sistema. A continuación, se describen las restricciones utilizadas para el montaje de cada uno de los componentes incluidos en este ensamblaje.

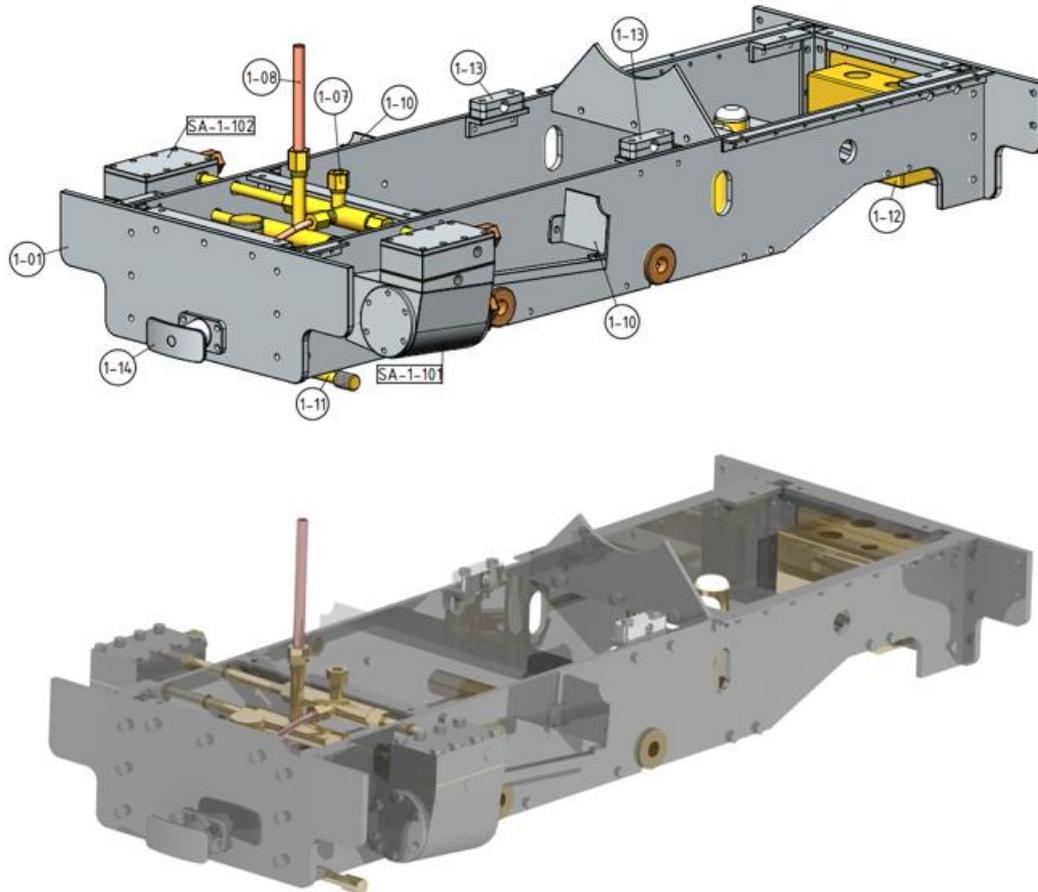


Figura 161. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-1-105

Para realizar el ensamblado, se comienza fijando en el espacio la estructura base (chasis) de la locomotora para poder ir añadiéndole los diferentes componentes.

Seguidamente, se alinean las perforaciones de los cilindros con las dispuestas en el chasis para su sujeción y se hacen coincidir las superficies de contacto. De la misma manera, se coloca el sistema de tuberías, conectando así ambos cilindros.

El proceso es semejante para el resto de las piezas; alineación y coincidencia. Es importante asegurarse de la posición correcta de las mismas mediante la visualización precisa de los planos [1].

En este punto del proyecto es cuando se añaden los tornillos que simulan visualmente la unión entre las piezas. Para ello, como se comentó anteriormente, se accede a la biblioteca disponible en CATIA que dispone de una gran variedad de estos elementos, por lo que resulta sencillo encontrar los que se ajustan a cada perforación.

5.3.4 SA-2-201

El ensamblaje SA-2-201 es responsable de conectar y sincronizar las ruedas. Este ensamblaje incluye el *coupling rod* y los tornillos necesarios para su fijación.



Figura 162. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-2-201

5.3.5 SA-2-202

El ensamblaje SA-2-202 es crucial para el mecanismo de movimiento de la locomotora de vapor, incluyendo el pistón y *crosshead* (pistón y cabezal móvil).

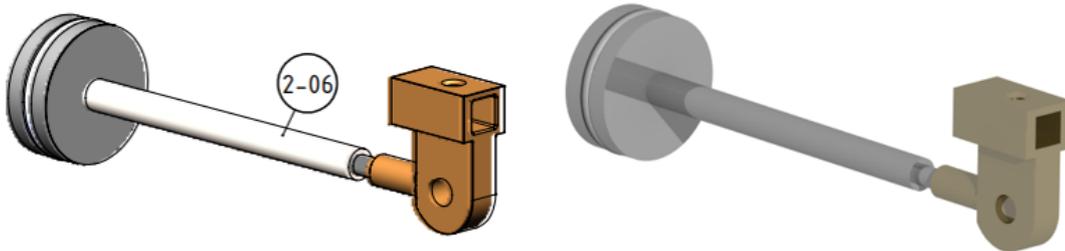


Figura 163. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-2-202

5.3.6 SA-2-203

El ensamblaje SA-2-203 incluye el *con-rod* (brazo de conexión) y los tornillos necesarios para el montaje.



Figura 164. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-2-203

5.3.7 SA-2-205

El ensamblaje SA-2-205 consiste en añadir al SA-1-105 las ruedas y las barras que componen el sistema de transmisión del movimiento.

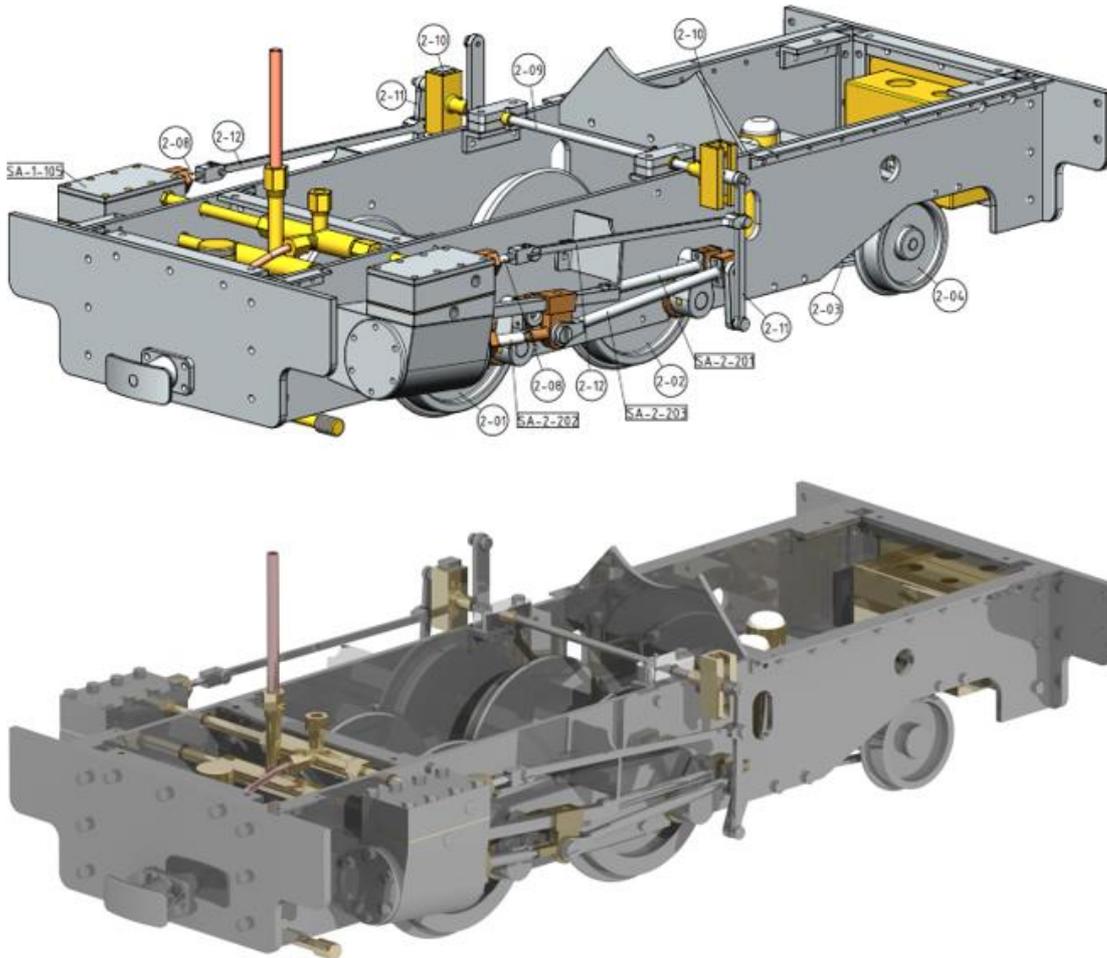


Figura 165. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-2-205

Para ello, se comienza fijando en el espacio el ensamblaje SA-1-105. El siguiente paso es añadir las ruedas de transmisión del movimiento y las de dirección, por lo que antes se debe colocar la pieza 2-03 que sujeta estas últimas (*bogie*). Para ello, se alinea dicha pieza bajo el ensamblaje utilizando las perforaciones pertinentes y se hacen coincidir las superficies. Una vez realizado este paso, se procede a añadir las ruedas.

Para colocar las mismas, se alinean los ejes con el chasis y se imponen restricciones de coincidencia entre las caras internas de las ruedas con las superficies de rozamiento del chasis.

Finalmente, se añade el sistema de transmisión. Para ello, se colocan las barras por orden a ambos lados, componiendo en pequeños pasos dicho sistema y asegurando su correcto funcionamiento. Todos estos elementos se ensamblan alineando perforaciones y añadiendo restricciones de contacto.

5.3.8 SA-3-301

El ensamblaje SA-3-301 es la estructura de la cámara de humo de la locomotora de vapor. Tras la Figura 166, se comenta el proceso de ensamblado de la misma.

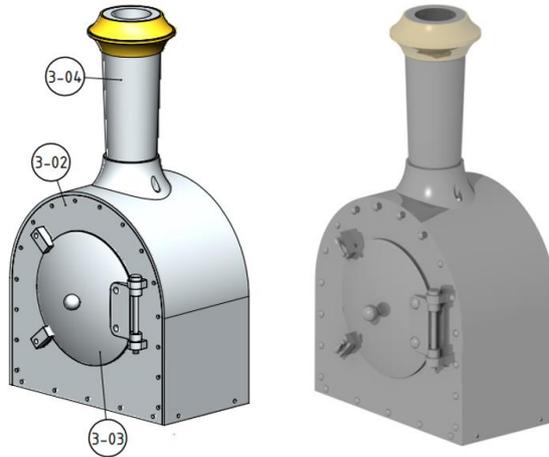


Figura 166. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-301

Se parte de la fijación en el espacio de la BRAZIL-3-02-SMOKEBOX SHELL (Carcasa de la cámara de humo). Una vez fijada, se alinea la pieza 3-03 que se corresponde con la puerta de acceso a la carcasa. Esta pieza se ensambla alineando la propia puerta con el hueco preparado para la misma, ya que es circular, y alineando el propio sistema de bisagra, ya que son restricciones perpendiculares.

A continuación, se pasa a añadir la chimenea, identificada como BRAZIL-3-04-SMOKE STACK. Para ello se alinea en la parte superior y se establece una restricción de contacto entre la superficie inferior de la parte de sujeción de la chimenea y la superficie curva superior de la carcasa.

5.3.9 SA-3-302

El ensamblaje SA-3-302 es igual que el anterior, pero añadiendo la pieza BRAZIL-3-01-FRONT END FOOT PLATE (Placa delantera del pie). Esta se ensambla alineando dos o más perforaciones de la parte inferior de la carcasa con direcciones perpendiculares.

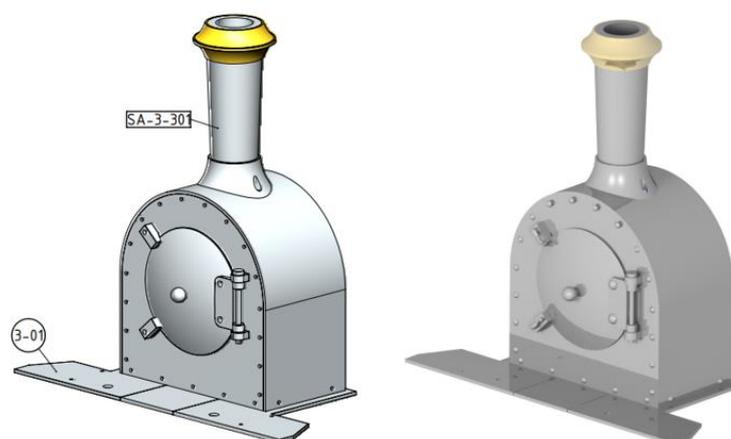


Figura 167. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-302

5.3.10 SA-3-303

El ensamblaje SA-3-303 es la base donde se coloca el maquinista. Comprende la placa del pie trasera, el conjunto de la palanca de reversa, los escalones traseros y el depósito de combustible (el proceso de ensamblado de esta parte se encuentra en el apartado siguiente).

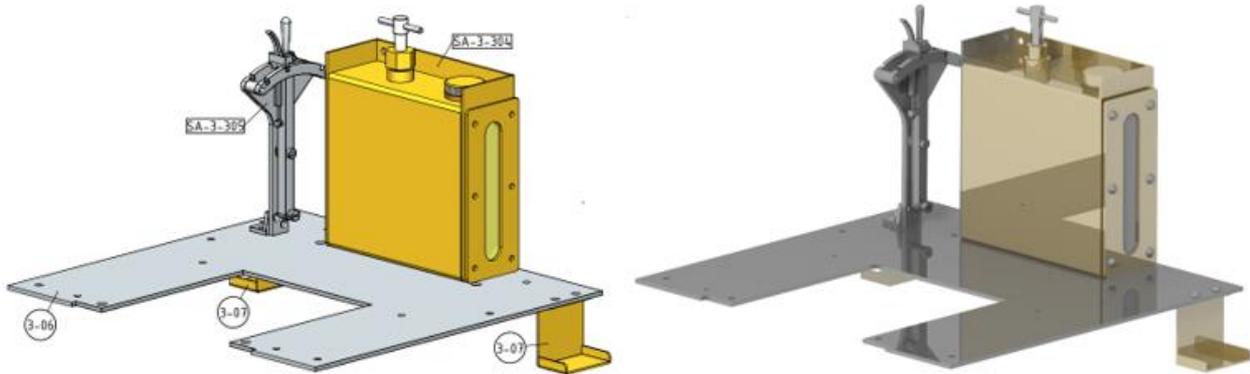


Figura 168. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-303

El método de ensamblaje no difiere de los ya comentados. Primero se fija en el espacio la placa de pie y posteriormente se van añadiendo el resto de piezas alineando las perforaciones e imponiendo restricciones de contacto entre sus superficies.

5.3.11 SA-3-304

El ensamblaje SA-3-304 es esencial para el sistema de combustible, integrando el tanque de combustible y la válvula de bombeo.

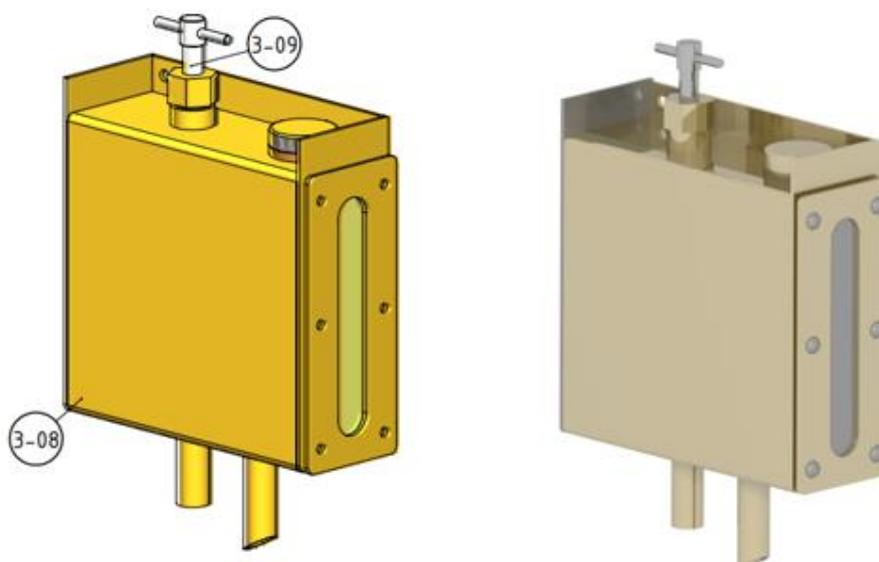


Figura 169. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-304

Se parte de la fijación en el espacio del propio tanque. Sguidamente, se alinea la válvula con su perforación correspondiente (la situada a la izquierda sobre la siperficie superior, situándonos delante del tanque), ya que dicha válvula está diseñada en forma tubular. En este caso, para introducir la válvula en el tanque, no se pueden emplear restricción de coincidencia, ya que no existe contacto entre sus superficies. Por ello, se usa una restricción de distancia entre dos superficies paralelas de ambos componentes. El modo de uso es similar a la de coincidencia, pero es necesario añadir la distancia entre ambas superficies. Dicha distancia no viene especificada en los planos del modelo [1], por lo que se ajusta observando las imágenes proporcionadas, intentado que se asemeje lo máximo posible.

5.3.12 SA-3-305

El ensamblaje SA-3-305 sirve para controlar la marcha, integrando el soporte de la palanca de reversa y la propia palanca.

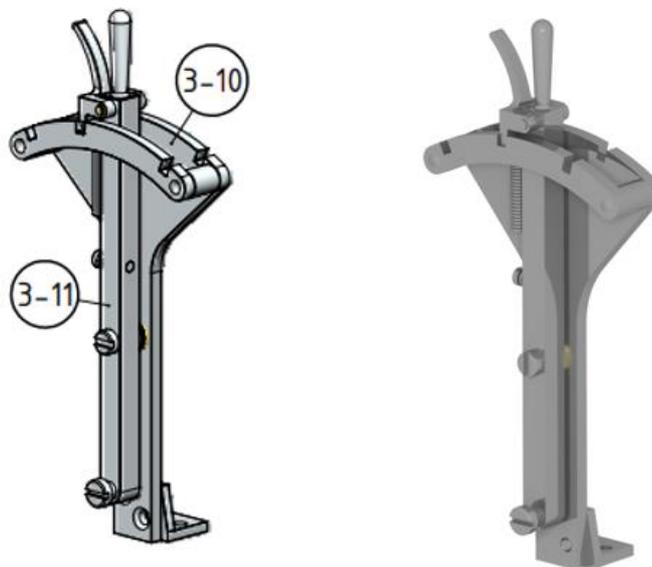


Figura 170. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-305

Como podemos observar, está formado por dos partes, el soporte y la palanca. Para su ensamblado, primero fijamos el soporte en el espacio y, posteriormente, alineamos el perno del punto de giro (ya implementado en el soporte) con la perforación preparada en la palanca. Finalmente, para colocar la palanca en su posición final, imponemos una restricción de coincidencia entre la cara interior de la cabeza del perno de giro, con la superficie frontal de la palanca, de modo que quede tal y como se muestra en la figura. En este tipo de ensamblajes, hay que asegurarse de que la composición de los elementos es correcta, ya que podría pasar que la palanca quedara orientada hacia abajo o fuera de la guía de movimiento y aún así, respete las restricciones impuestas. De ser así, habría que utilizar las herramientas de movimiento para recolocar los elementos lo más próximos posible a la posición final. De esta manera, al actualizar el ensamblado, quedan todos los componentes fijados en la posición correcta.

5.3.13 SA-3-310

El ensamblaje SA-3-310 es la integración de varios subconjuntos ensamblados anteriormente.

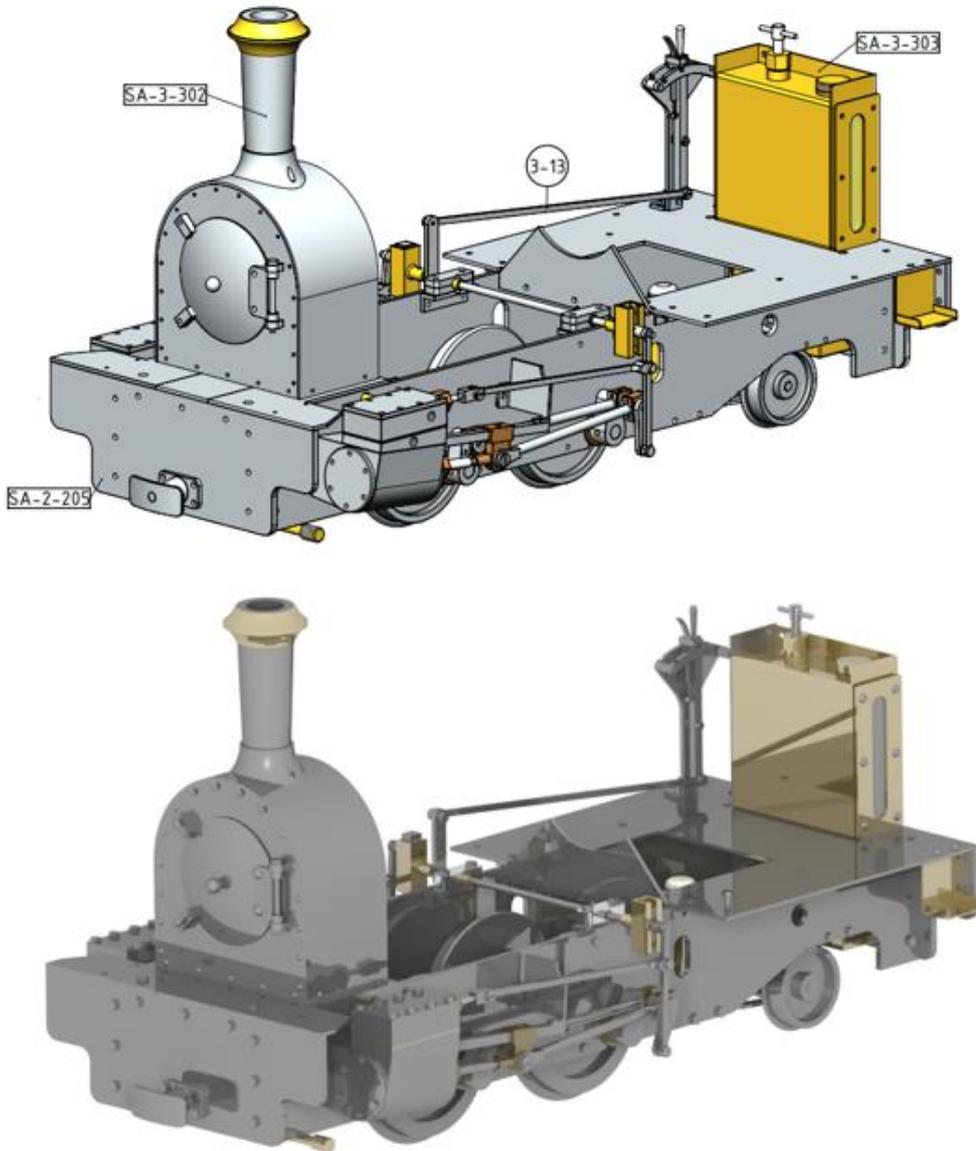


Figura 171. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-3-310

Se parte de la fijación de uno de los subconjuntos en el espacio para trabajar sobre el mismo. Se escoge como elemento base el de mayor tamaño, SA-2-205. Sobre el mismo se coloca:

- SA-3-302: Se alinean las perforaciones de la placa base de la misma con las de las escuadras del chasis de la locomotora, situándola encima del componente fijado y con la orientación correcta. Seguidamente se impone una restricción de coincidencia entre la superficie inferior de la placa y la superficie superior del chasis.
- SA-3-303: Exactamente igual que el subconjunto anterior.
- La pieza 3-13: Forma parte del sistema de inversión de marcha, uniendo la palanca situada en la cabina con el sistema de transmisión. Su ensamblaje resulta sencillo, basándose en alineación de perforaciones y restricciones de coincidencia entre superficies.

5.3.14 SA-4-401

El ensamblaje SA-4-401 comprende la cámara de fuego y la propia caldera. Durante el funcionamiento de la locomotora, este ensamblaje está en contacto con los fluidos de trabajo en todas sus fases; agua líquida y vapor, y el gas de la combustión del carbón. Debe garantizar la estanqueidad del sistema, por lo que la mayoría de las uniones entre las piezas se realiza por soldadura.

Como se puede observar en la Figura 172, todas las piezas que lo conforman se caracterizan por ser tubulares o contener perforaciones, por lo que contienen ejes longitudinales que sirven para imponer las restricciones necesarias.

Además, en cuanto a los materiales, las piezas están modeladas en bronce (bronze), latón, (*brass*) y cobre (*copper*). Estos materiales se utilizan en las piezas en contacto con líquidos y vapores, debido a sus excelentes propiedades de resistencia a la corrosión y durabilidad. Disponen de una notable capacidad para resistir la oxidación y la corrosión en ambientes húmedos y con presencia de sustancias químicas, lo que los hace ideales para aplicaciones en sistemas de intercambiadores de calor y componentes de maquinaria. Además, su alta conductividad térmica contribuye a la eficiencia en la transferencia de calor.

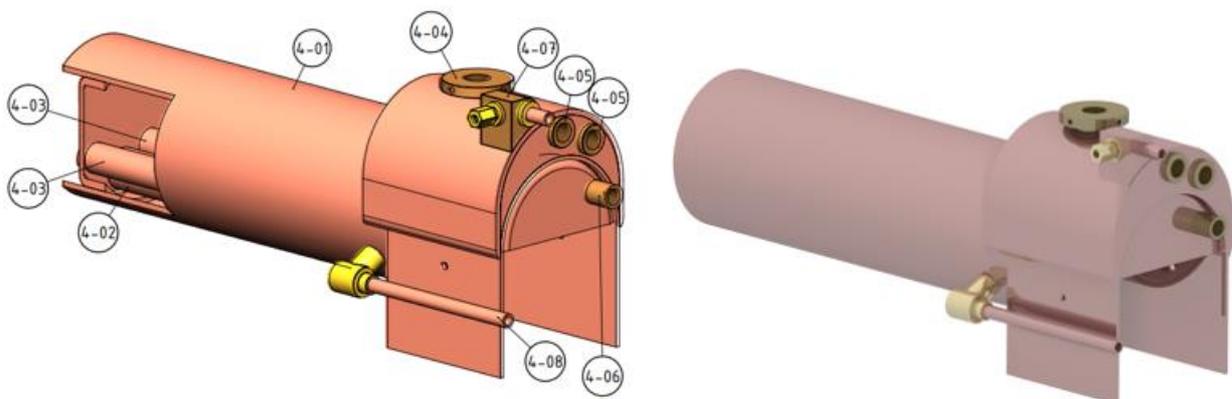


Figura 172. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-4-401

Se parte fijando el tubo principal en el espacio (4-01), cuya función es contener el agua líquida, en un principio. Para colocar el resto de piezas, el proceso no difiere de lo comentado en otros apartados. Se utilizan los ejes longitudinales para imponer restricciones de alineación y restricciones de coincidencia entre las superficies de contacto. De esta manera, siguiendo el orden adecuado, se ensambla el conjunto completo.

En los casos de las piezas 4-04, 4-07 y 4-08, en las que una o ambas superficies del contacto son curvas, dichas restricciones no se pueden fijar. Por ello, se emplean las herramientas que permiten mover las piezas en el espacio, para que una vez alineadas por los ejes, desplazarlas por el mismo hasta situarlas en la posición correcta, dando así lugar al contacto deseado.

El orden seguido parte de añadir las piezas que actúan como “tapa” de los cilindros longitudinales, así como los elementos semitubulares de la parte trasera, que conforman la carcasa de la cámara de fuego y el sistema de distribución del vapor. Finalmente se implementan las tuberías internas y los sistemas de conexión de la zona trasera.

En la siguiente figura, se muestra desde otro ángulo el ensamblaje modelado, además de haberse ocultado la pieza 4-01, correspondiente con la carcasa del tanque de agua líquida, para poder observar la disposición de las tuberías dentro del conjunto.

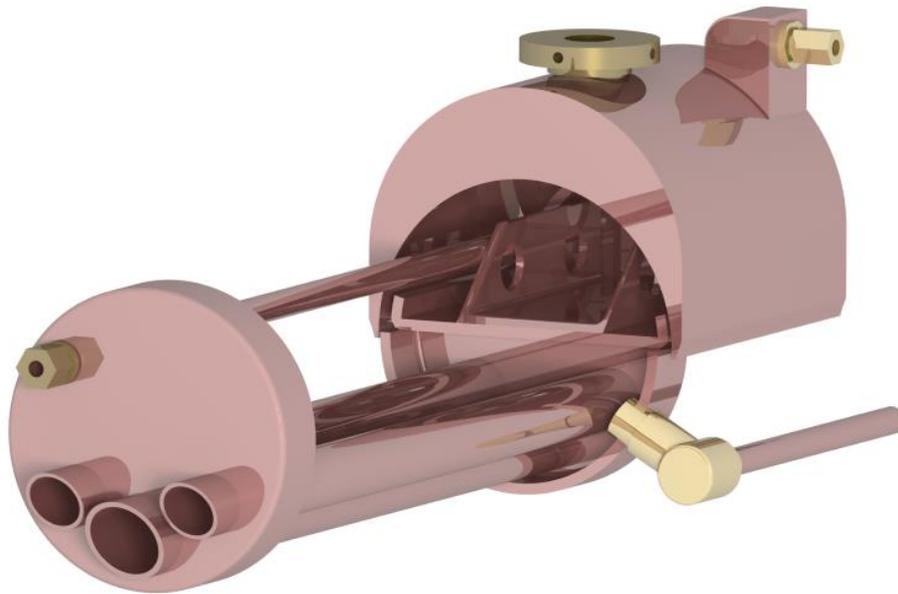


Figura 173. Imagen renderizada del interior del conjunto SA-4-401

5.3.15 SA-4-402

El ensamblaje SA-4-402 es esencial para el monitoreo y control de los niveles de agua en la caldera de la locomotora de vapor. Conecta el tubo que trae el agua líquida desde el tanque, con el dispositivo de medición de presión.

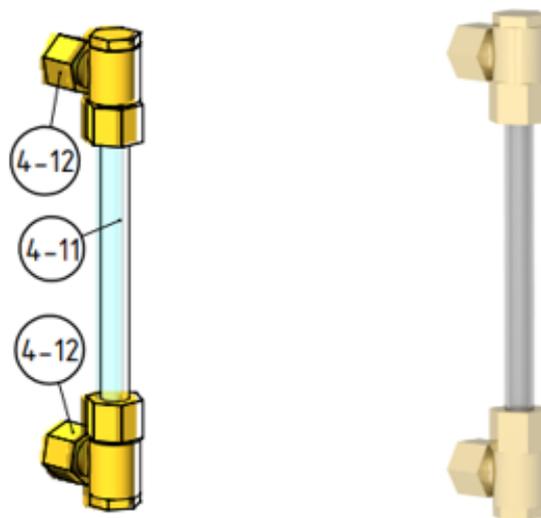


Figura 174. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-4-402

La forma de ensamblaje consiste en fijar en el espacio el tubo transparente (4-11), y añadir a cada uno de los extremos las conexiones en “L” y los elementos de apriete (4-12) mediante alineación de ejes y restricciones de contacto.

Para que el tubo sea transparente y poder ver así el nivel del agua, se establece como material el vidrio (*Glass*), tal y como se indica en los planos del modelo [1].

5.3.16 SA-4-405

El ensamblaje SA-4-405 integra el sistema de la caldera (SA-4-401) con elementos complementarios. Dichos elementos se corresponden con válvulas y tuberías secundarias, así como la puerta de acceso a la cámara de fuego que permite introducir el carbón en la misma y la base del sistema silbato.

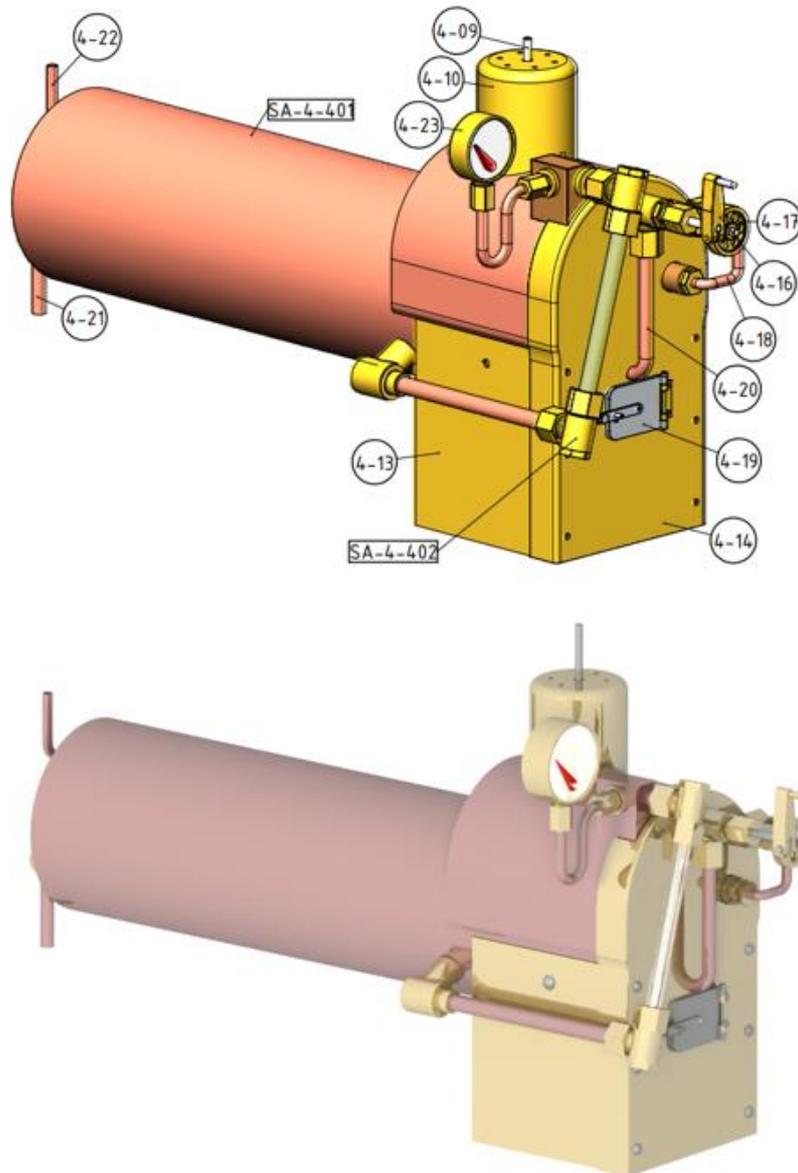


Figura 175. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-4-405

Para ensamblar el conjunto, vuelve a ser de gran utilidad los ejes longitudinales, por la forma tubular o semitubular de las piezas o parte de las mismas. Por este motivo, el proceso seguido se basa en alineación de ejes y coincidencia de superficies.

Destacan las piezas 4-13 y 4-14 modeladas en latón (*Brass*), que envuelven la parte trasera del conjunto cerrando herméticamente la cámara de fuego mediante pins, siendo estas piezas las únicas del presente ensamblaje que requieren este tipo de unión.

En el caso de la puerta de acceso a la cámara de fuego (4-19), el método de colocación es similar al de la puerta del ensamblaje SA-3-301, basándose en el sistema de bisagras.

5.3.17 SA-4-410

Para realizar el ensamblaje del SA-4-410, que incluye los ensamblajes SA-4-405 y SA-3-310 junto con los tornillos, se utilizan restricciones de alineación entre el tanque de agua y el orificio trasero de la cámara de gases, ensamblado previamente en el SA-3-310, y restricciones de distancia entre la cara trasera de la cámara de fuego y la cara delantera del tanque de combustible, ajustándola poco a poco hasta colocarla en su lugar, ya que en los planos [1] no se especifica dicha distancia. Además, para garantizar que la colocación es correcta, se impone una restricción de ángulo entre la cara lateral de la cámara de fuego y cualquiera de las superficies horizontales del conjunto ensamblado hasta el momento, fijando dicho ángulo en 90° para garantizar la perpendicularidad.

Al igual que en el resto de ensamblajes, puede ocurrir que la orientación de sus componentes no sea la correcta pero se respeten las restricciones. De nuevo, se puede hacer uso de las herramientas de movimiento para cambiar la distribución y, posteriormente, actualizar el ensamblaje para que quede montado adecuadamente.

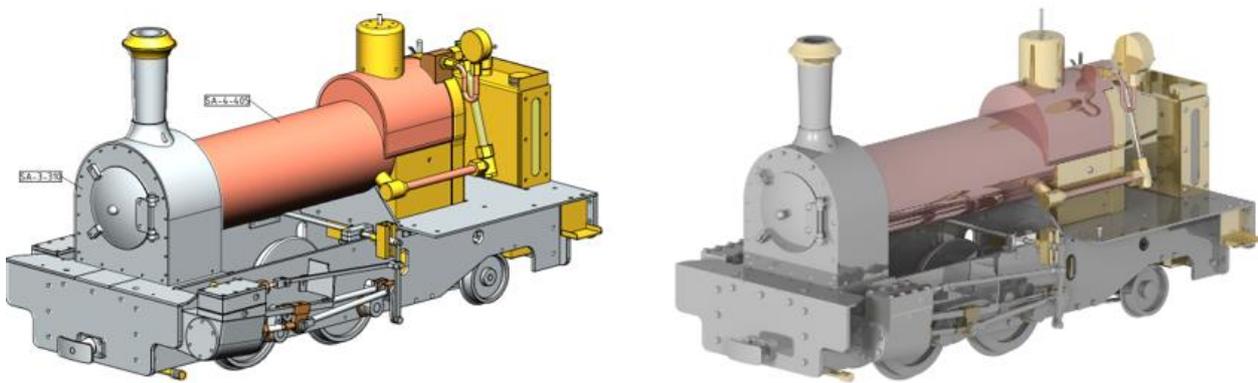


Figura 176. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-4-410

5.3.18 SA-5-501

El ensamblaje SA-5-501 se corresponde con el depósito de agua. Este se monta sobre el tanque de la caldera, por lo que su sección tiene forma de semicorona.

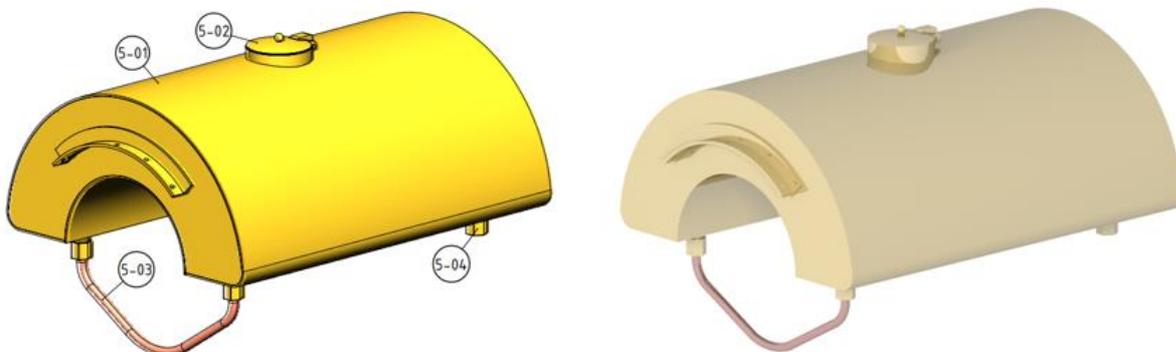


Figura 177. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-5-501

El proceso de ensamblado se basa en la fijación en el espacio del propio tanque. Posteriormente se monta la tapa superior, con el mismo método que en la tapa del ensamblaje SA-3-301. Finalmente en la parte inferior, se añade la tubería de conexión (5-03), que permite que el agua se mantenga al mismo nivel a ambos lados del depósito, junto con las tuercas de apriete, mediante restricciones de alineación y coincidencia.

5.3.19 SA-5-502

El ensamblaje SA-5-502 es el conjunto de acero que envuelve y protege el compartimento del maquinista, ofreciendo paredes laterales, frontal, trasera y un techo. Además, dispone de una placa situada a la altura de visión de los tripulantes. Entre sus funciones, destaca la de evitar que el humo procedente de la chimenea entre en este espacio y cause posibles problemas. Aún así, está diseñada para permitir la visión del maquinista y tener acceso al mecanismo silbato mediante amplios huecos en los extremos superiores.

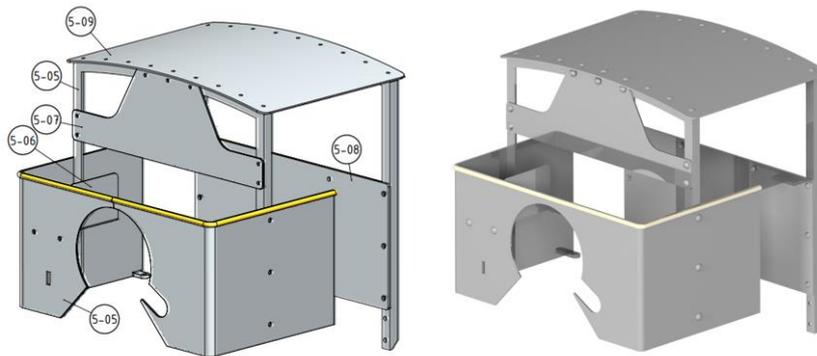


Figura 178. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-5-502

Este ensamblaje, al igual que en la mayoría de los ya explicados, se basa en alineación de perforaciones y restricciones de coincidencia entre superficies planas. En el caso del techo, al ser superficies curvas, el contacto se impone mediante el desplazamiento manual del mismo una vez se encontraba alineado, acercándolo lo máximo posible hasta considerar que se produce adecuadamente el contacto.

La unión de todos sus componentes se realiza mediante pins.

5.3.20 SA-5-505

El ensamblaje SA-5-505 se corresponde con el ensamblaje final del modelo. Se basa en añadir al SA- 4-410, los dos conjuntos comentados anteriormente, el SA-5-501 y el SA-5-502.

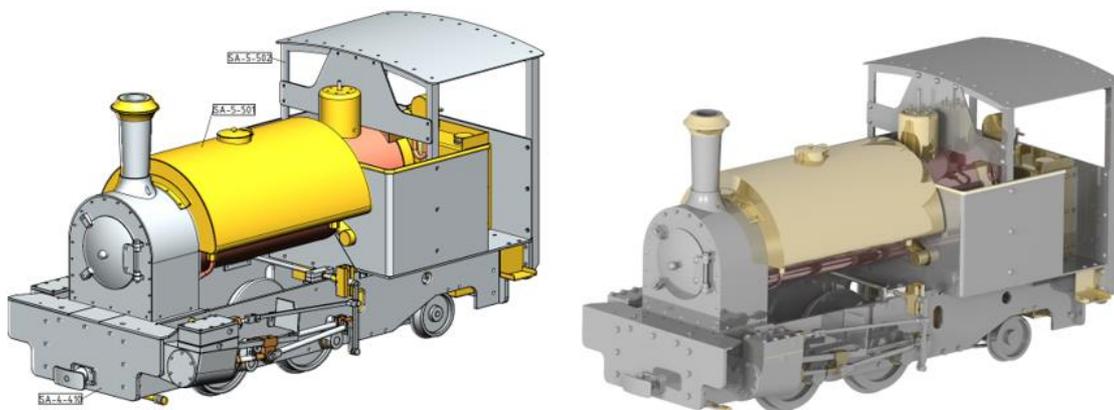


Figura 179. Esquema [1] e imagen renderizada del conjunto SA-5-505

El método no difiere de lo ya comentado en varias ocasiones, empleándose restricciones de alineación entre perforaciones y restricciones de contacto entre superficies.

En este caso, las uniones se realizan mediante tornillos (*screws*).

5.3.21 Ensamblaje extra

Finalmente, para completar el modelo, se le añaden los elementos diseñados para tal objetivo. Como ya se explicó en el capítulo anterior, dichos elementos no aparecen en los planos [1], por lo que se ha tenido total libertad durante el proceso de diseño. Se corresponden con el foco frontal y el sistema de actuación del mecanismo silbato.



Figura 180. Imágenes del foco y del mecanismo silbato renderizados

Para colocar dichos elementos sobre el conjunto SA-5-505, se procede de la misma manera que en el resto de ensamblajes, alineación de ejes de perforaciones y restricciones de contacto entre superficies.

En el caso del foco, se coloca en el frente de la locomotora con la ayuda de las 4 perforaciones superiores de la parte frontal de la cámara de humos (SA-3-301).

Por otro lado, el mecanismo silbato se coloca sobre la base preparada para el mismo, alineando al menos dos de las perforaciones existentes. Al ser la distribución de las mismas circular, hay que tener en cuenta la disposición del sistema, ya que ha sido diseñado para tener acceso desde la cabina y, por tanto, debe quedar el sistema de barras lo más próximo posible al hueco derecho de visión.

La unión de estos elementos se realiza con *pins* y tornillos (*screws*), respectivamente.

5.4 Renderizado

En este apartado, tal y como se comentó al comienzo del capítulo, se recogen diversas imágenes renderizadas del modelo completo. En ellas se pueden observar los detalles de la locomotora.

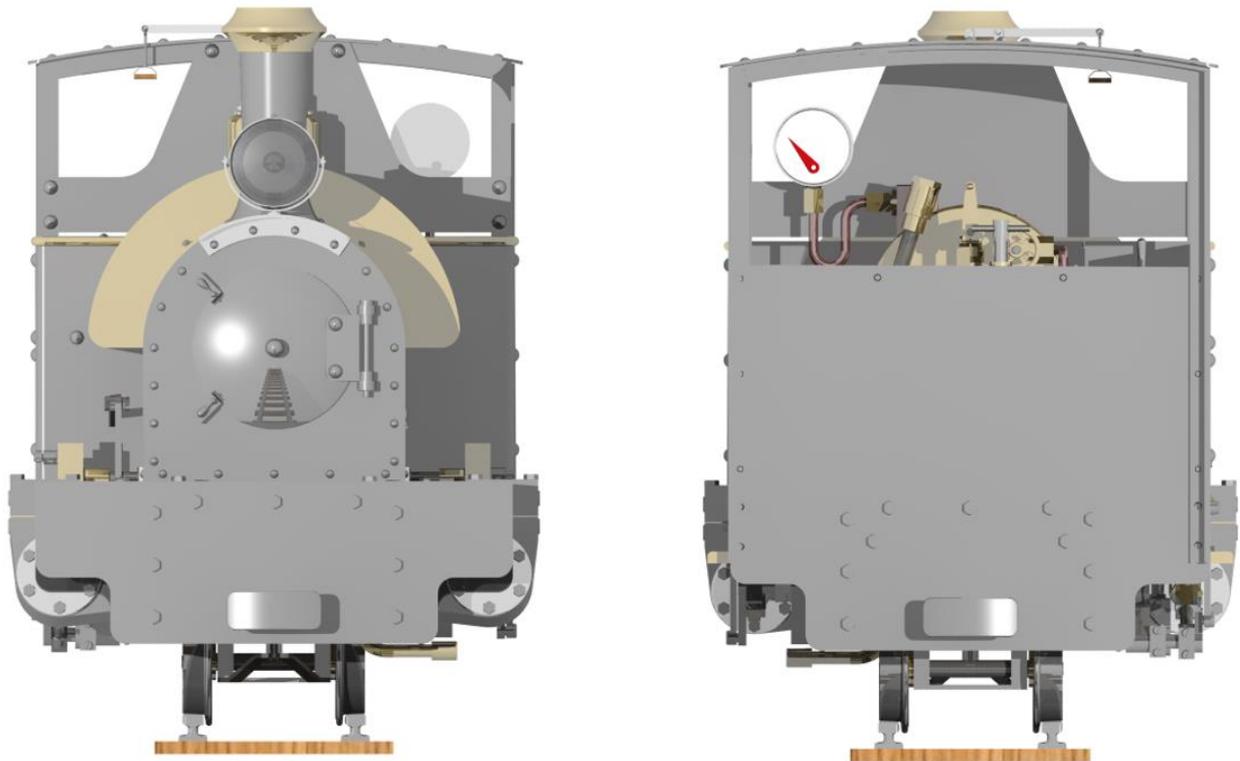


Figura 181. Imagen renderizada de la vista frontal y trasera de la locomotora.

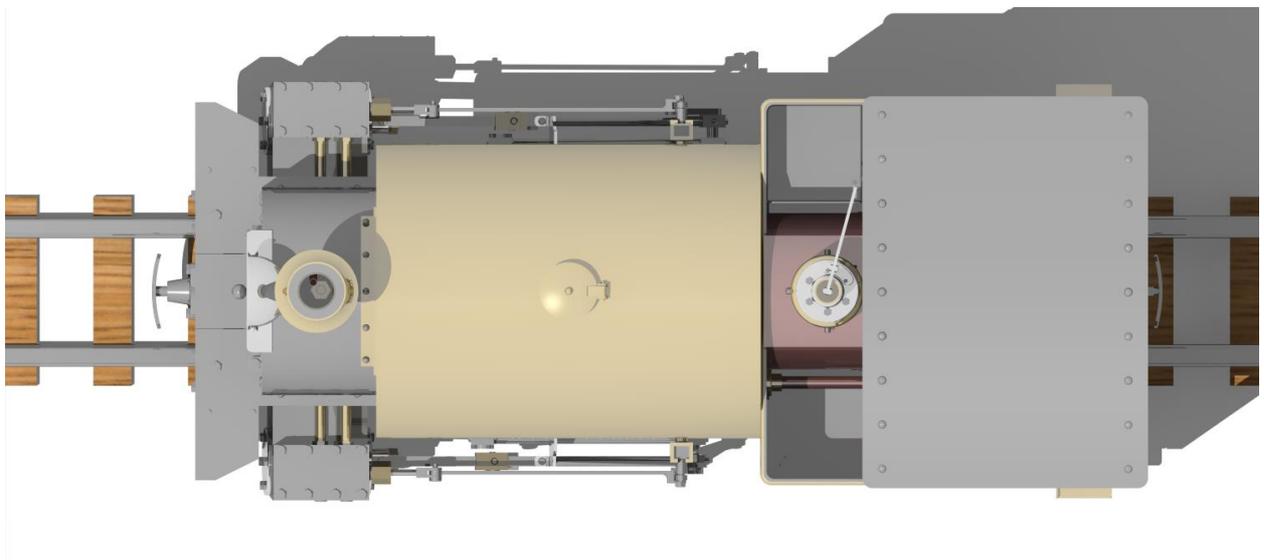


Figura 182. Imagen renderizada de la vista en planta de la locomotora.

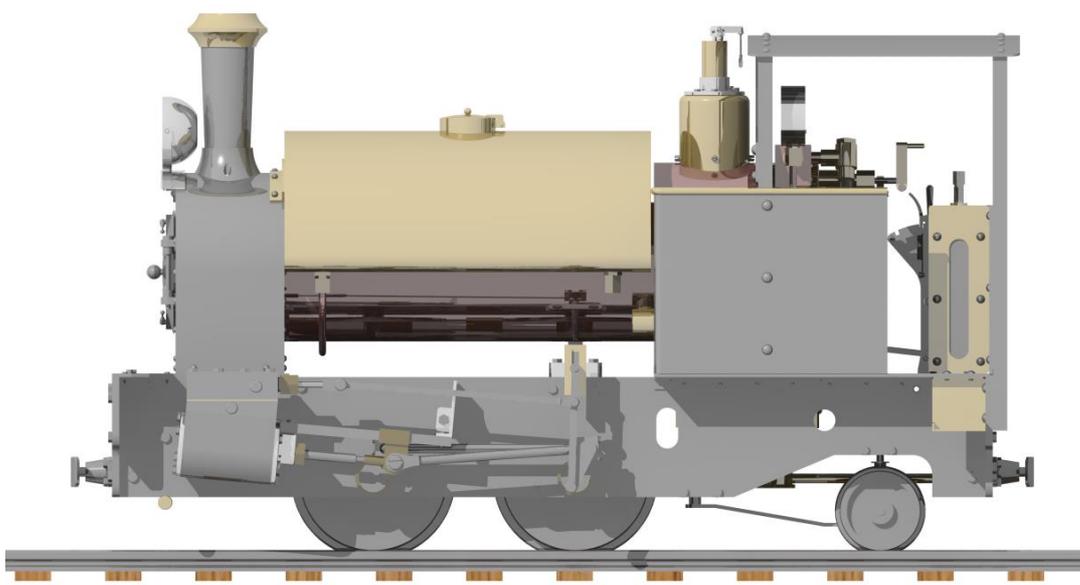


Figura 183. Imagen renderizada de la vista lateral de la locomotora.

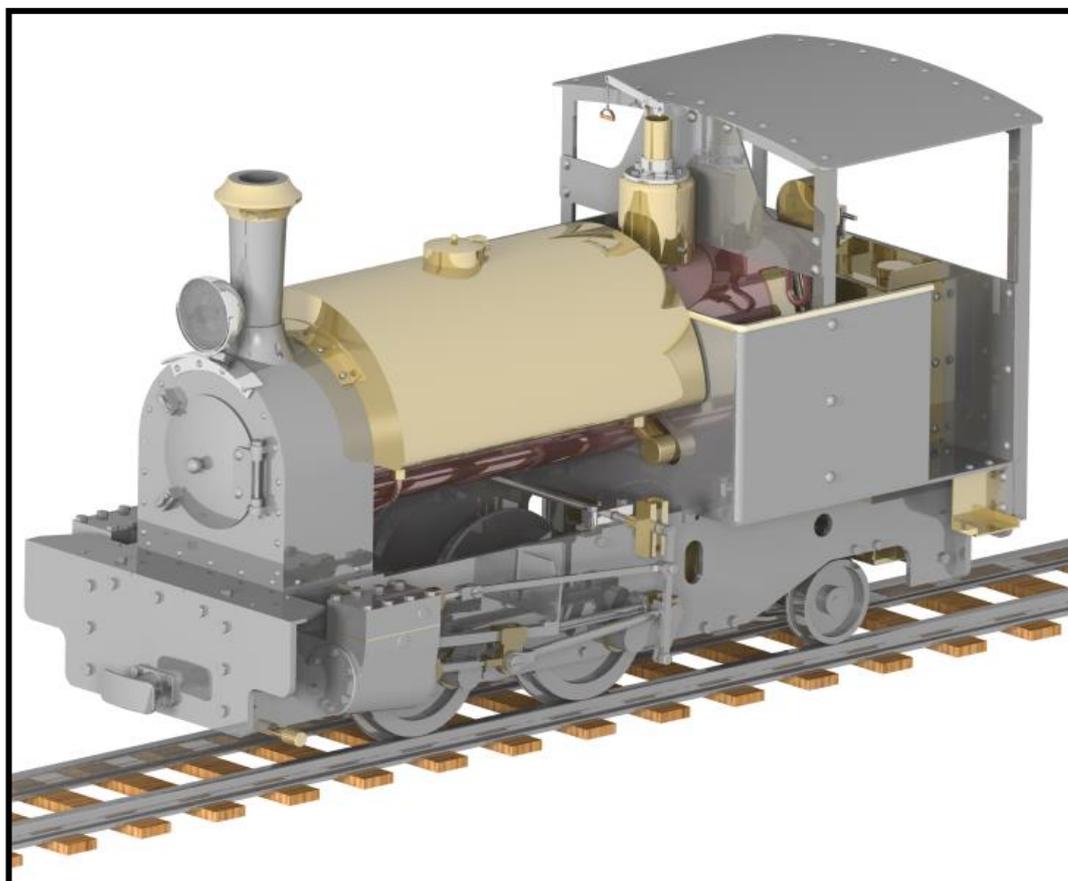


Figura 184. Imagen renderizada de la vista general de la locomotora.

6 ANIMACIÓN

En este capítulo, se recoge el proceso de animación del modelo de la locomotora de vapor utilizando CATIA V5. La animación es una herramienta poderosa que permite visualizar el funcionamiento dinámico de cada componente y sistema. A través de ello, se puede observar cómo interactúan las diversas partes mecánicas durante la operación, proporcionando una comprensión visual detallada de su comportamiento en tiempo real.

6.1 Proceso de Animación

El proceso llevado a cabo para crear las diferentes animaciones de los mecanismos del modelo ha sido el siguiente:

1. Preparación del ensamblaje para la animación

Antes de realizar la animación, se ha tenido en cuenta que el movimiento del modelo implica la interacción entre diferentes *Products*, lo que impide utilizar el ensamblaje final completo. En su lugar, se ha empleado un ensamblaje que contiene los elementos móviles como productos separados. Además, algunos *Products* han sido modificados, eliminando dichas piezas móviles de sus estructuras originales para permitir que puedan añadirse de manera efectiva en la animación, garantizando así un movimiento realista y fluido en todo el mecanismo. Un claro ejemplo de ello, ha sido el ensamblaje SA-4-405 al que se le ha quitado parte de la *Safety Valve* para realizar la animación más tarde. Con ello, el ensamblaje pasa a llamarse “SA-4-405-ANIMACION”.

2. Acceder al workbench *DMU Kinematics*

Se busca el módulo *Mechanical Design* en el desplegable que aparece al clicar sobre la pestaña *Start*, situada en la barra superior de opciones de la interfaz del programa. De esta manera accedemos a un nuevo desplegable, en el cual aparece el *workbench DMU Kinematics*, tal y como se muestra en la Figura 185.



Figura 185. Acceso al módulo *DMU Kinematics*

3. Creación de los mecanismos.

Una vez entramos al *workbench* deseado, el primer paso es crear los mecanismos. Para ello se debe buscar el símbolo del ancla que permite fijar un elemento o conjunto de elementos en el espacio. De esta manera, el programa indica que se debe crear primero un mecanismo.

Para este proyecto, se han creado dos mecanismos, uno llamado “ANIMACIÓN” el cual comprenderá todo el sistema de barras que permiten el desplazamiento de la locomotora, y otro llamado “BOCINA” que se centra en el mecanismo silbato que permite realizar señales acústicas.

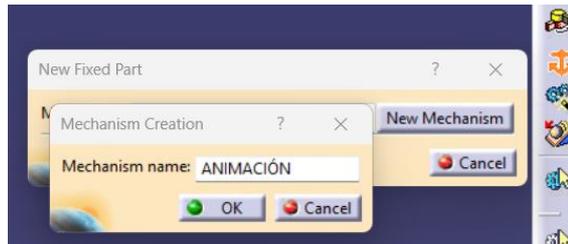


Figura 186. Creación del mecanismo “ANIMACIÓN”



Figura 187. Mecanismos del modelo

4. Fijación en el espacio

Una vez creado los mecanismos se fija un elemento o conjunto de elementos en el espacio que no tengan movimiento, para que sirva como punto de apoyo para el resto de piezas.

5. Definición de *Kinematics Joints*.

Se aplican restricciones de movimiento (*Kinematics Joints*) a cada componente para replicar su comportamiento realista. Esto incluye limitaciones de rotación con la herramienta *Revolute Joint* (Primera opción de la Figura 188), deslizamiento con la herramienta *Prismatic Joint* (Segunda opción de la Figura 188), *Planar Joint* (Sexta opción de la Figura 188) y restricciones de conexión con la herramienta *Rigid Joint* (Séptima opción de la Figura 188).

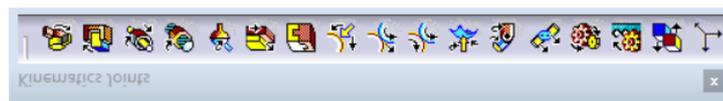


Figura 188. Panel *Kinematics Joints*

Cabe destacar que es imprescindible establecer alguna de las restricciones (ya sea de rotación o desplazamiento lineal) como conducidas, en cada ensamblaje móvil diferente que se conecte al bloque principal. Éste es, aquel que se fija en el espacio. Para ello, una vez seleccionada la restricción, se debe activar dicha opción en la pestaña emergente, así como establecer distancias o ángulos de inicio y fin, dependiendo de si es una restricción de movimiento lineal o angular. De esta manera, se establece el “motor” del movimiento de la animación, siendo a veces necesario establecer varias restricciones conducidas para que el mecanismo funciones de manera correcta.

A modo de ejemplo, se muestran a continuación algunas de las uniones características de cada mecanismo:

Mecanismo *ANIMACIÓN*

Se comienza estableciendo *Fix Part* en el ensamblaje SA-1-105 (chasis de la locomotora) para fijarlo en el espacio y que actúe como soporte para el resto de los movimientos. Este elemento fijo proporciona un punto de referencia estable, lo que permite que los demás componentes móviles se organicen y se conecten de manera coherente. De esta manera, se logra un entorno de animación en el que los movimientos de las partes móviles son precisos y se alinean con la lógica del diseño.

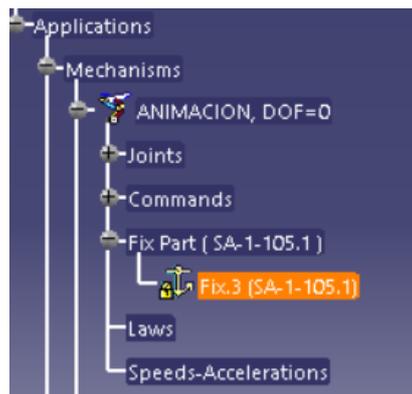


Figura 189. Restricción de fijación (*Fix Part*) en el chasis (ensamblaje SA-1-105)

En la Figura 190 se observa la restricción de revolución **conductora** entre la rueda y el chasis, siendo la que genera el movimiento del mecanismo de transmisión. Al ser conductora, se le ordena que gire de 0 a 360 grados, y este movimiento impulsa todas las piezas conectadas directa o indirectamente. Esto arrastra las partes del sistema, como las bielas y otros componentes, simulando el movimiento real del mecanismo de transmisión de la locomotora.

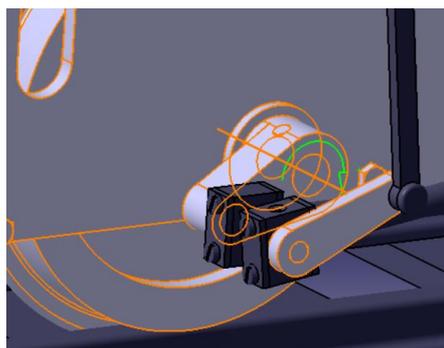


Figura 190. Restricción conducida de revolución (*Revolute Joint*) en rueda

En la siguiente figura, se muestra una restricción de deslizamiento entre la barra guía y el pistón, lo que asegura que el movimiento de este ocurra de manera lineal a lo largo de la barra. Esta restricción permite que se mueva hacia adelante y hacia atrás dentro del cilindro, simulando el ciclo de funcionamiento. Es fundamental para mantener el pistón alineado mientras realiza su movimiento, evitando desviaciones o desplazamientos no deseados.

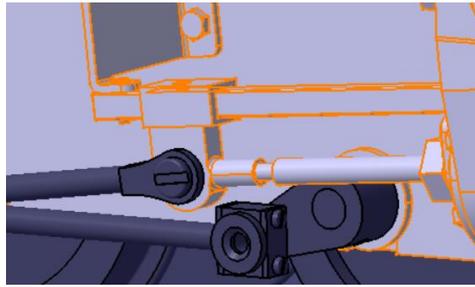


Figura 191. Restricción de deslizamiento (*Prismatic Joint*) en guiado de pistón

En la Figura 192, se observa otra restricción de deslizamiento, pero en este caso entre el *Expansion Link* y el *Die Block*, que permite que el bloque se desplace de manera controlada a lo largo del perfil lineal de la guía. Este movimiento es clave en el mecanismo de transmisión de la locomotora, ya que regula el cambio en la dirección del vapor y ajusta la marcha de la locomotora con un movimiento suave.

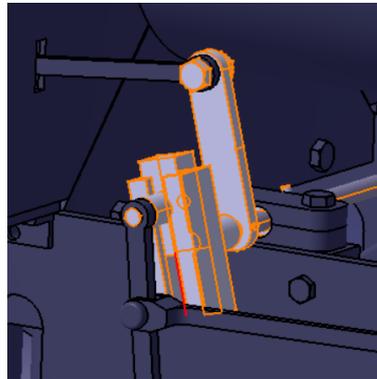


Figura 192. Restricción de deslizamiento (*Prismatic Joint*) entre el *Expansion Link* y el *Die Block*

Se establece una restricción conducida de revolución entre el *Expansion Link* y el chasis (Figura 193), lo cual es esencial para el funcionamiento del mecanismo. Esta restricción es conducida porque el *Expansion Link* actúa como un producto individual que está en contacto directo con el elemento fijado, lo que permite que su movimiento gire alrededor de un eje definido.

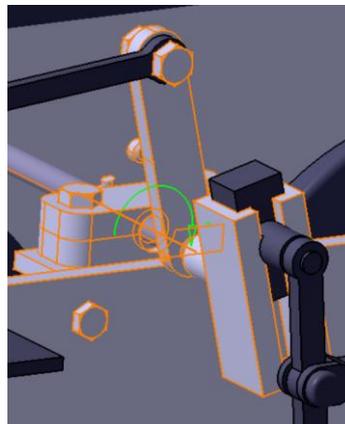


Figura 193. Restricción conducida de revolución (*Revolute Joint*) entre el *Expansion Link* y el chasis

Se aplica una restricción planar entre la válvula deslizante y el compartimento que la alberga, el cual

está contenido en el mismo producto que el chasis. Esta restricción planar es fundamental para asegurar que la válvula se desplace de manera controlada dentro de su compartimento, limitando su movimiento a un plano específico. Al establecer esta restricción, se garantiza que la válvula mantenga su orientación y posición correcta mientras se activa y desactiva.

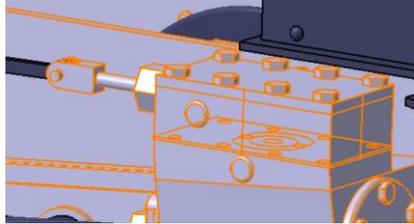


Figura 194. Restricción planar (*Planar Joint*) entre la válvula deslizante y su compartimento

La restricción de rigidez mostrada en la Figura 195 entre el soporte de la palanca de inversión (*reversing lever stand*) y el chasis, es crucial para garantizar la estabilidad y la durabilidad del sistema. Esta restricción asegura que el soporte de la palanca esté firmemente fijado al chasis, evitando cualquier movimiento indeseado que podría afectar la funcionalidad de la palanca de inversión.

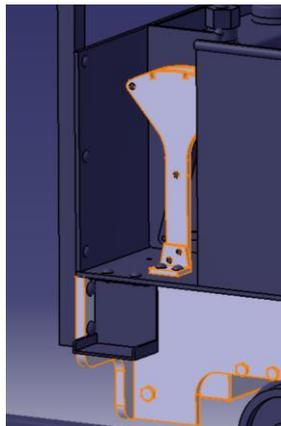


Figura 195. Restricción de conexión (*Rigid Joint*) entre el chasis y el *reversing lever stand*

La restricción de rotación conducida (Figura 196) entre la palanca de inversión (*reversing lever*) y su accionador sirve únicamente para simular el accionamiento manual del mecanismo. Esta restricción permite que el accionador gire alrededor de un eje específico, replicando el movimiento que el maquinista realizaría al manipular la palanca de inversión. Debe ser una restricción conducida para poder moverlo independientemente del resto del mecanismo y, de esta manera, una simulación realista del proceso.

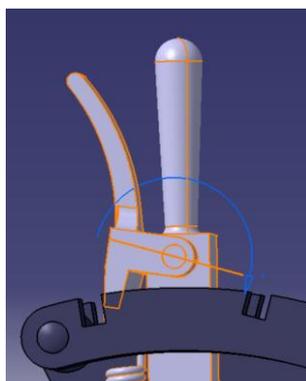


Figura 196. Restricción de revolución (*Revolute Joint*) entre el *reversing lever* y su accionador

Mecanismo BOCINA

En la Figura 197, se observa la restricción de revolución conducida en el mecanismo silbato que rige el efecto palanca sobre el punto de apoyo. Esta restricción permite que la palanca gire de manera controlada, replicando el movimiento que se requiere para accionar el silbato. Al ser una restricción conducida, asegura que cualquier rotación de la palanca esté sincronizada con el funcionamiento del sistema, garantizando así un control efectivo sobre el mecanismo.

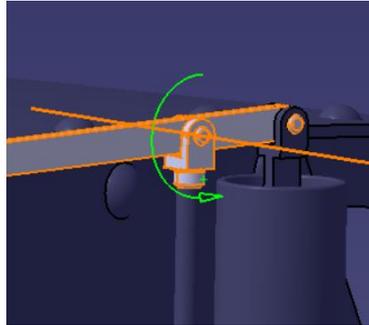


Figura 197. Restricción conducida de revolución (*Revolute Joint*) en el mecanismo silbato

La restricción de deslizamiento entre el soporte del silbato y la pieza 4-09.3 de la *Safety valve* es fundamental para permitir el movimiento controlado del mecanismo. Esta restricción controla que las piezas móviles de la válvula desarrollen el movimiento vertical característico. Es clave para la funcionalidad del sistema, ya que permite la activación y desactivación del silbato de manera efectiva, sin comprometer la estabilidad del ensamblaje.

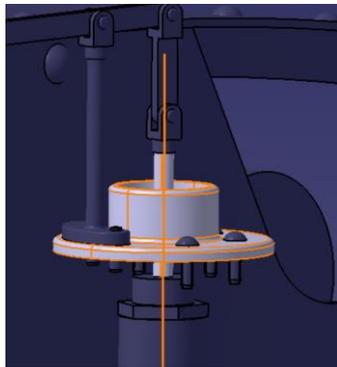


Figura 198. Restricción de deslizamiento (*Prismatic Joint*) en el mecanismo silbato

En este punto se han comentado las restricciones más características del modelo, destacando aquellas conducidas que conectan los elementos móviles con el chasis fijado. Estas restricciones son fundamentales para el funcionamiento adecuado del mecanismo, ya que aseguran que los movimientos de las piezas estén coordinados y respondan de manera precisa a las interacciones requeridas. Además, se ha presentado al menos una restricción de cada tipo, lo que proporciona una visión general del conjunto de relaciones que rigen el comportamiento del modelo. Sin embargo, es importante señalar que existen muchas más restricciones dentro del propio mecanismo que contribuyen a su operatividad y complejidad. Estas restricciones adicionales son clave para un funcionamiento fluido y eficiente, y reflejan la riqueza del diseño y la ingeniería detrás del modelo.

6. Creación de la simulación.

Una vez establecidas correctamente las restricciones necesarias, aparecerá en la pantalla un mensaje indicando que el mecanismo puede ser simulado. Por tanto, el siguiente paso es crear las simulaciones. Para ello buscamos la herramienta *Simulation*, cuyo símbolo son dos engranajes, tal y

como se puede observar en la Figura 199.

Al igual que durante la creación de los mecanismos, se han creado dos simulaciones, una para cada sistema.

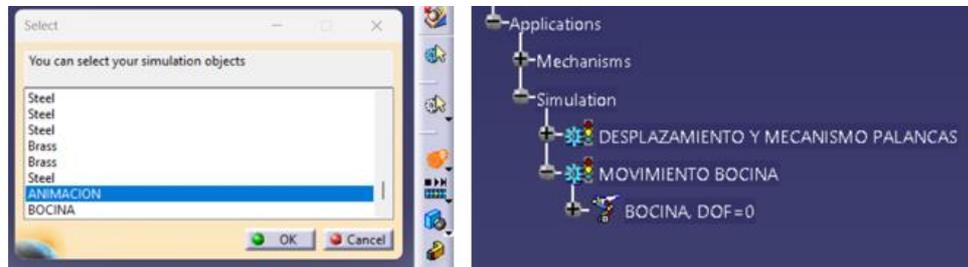


Figura 199. Creación de las simulaciones

7. Creación de secuencias de animación.

Se procede a crear secuencias de animación paso a paso, utilizando el generador de secuencias. Cada acción y reacción de los componentes se programa insertándolo en la simulación, para representar el ciclo de funcionamiento de la locomotora.

Para ello, se comienza fijando los rangos de funcionamiento de cada restricción conducida (por ejemplo, la *Command.1* corresponde al movimiento de giro de las ruedas respecto a la plataforma base de la locomotora, por lo que el rango va desde 0 hasta los 360°). Seguidamente, se coloca cada restricción en el valor que se desea y se inserta en la simulación. De esta manera, insertando valores de inicio y final, el programa crea el movimiento para llevar los valores iniciales a los finales, dando lugar a la simulación completa.

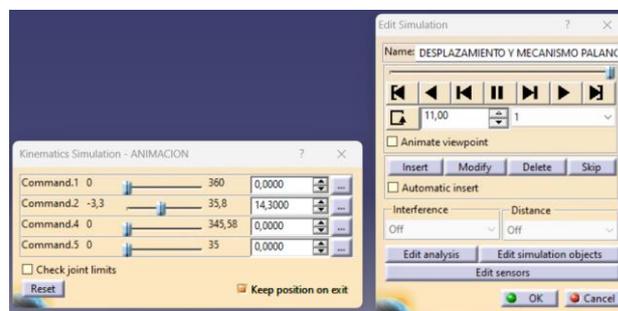


Figura 200. Interfaz de creación de las secuencias

Este proceso permite no solo visualizar cómo interactúan las partes mecánicas, sino también validar el diseño y optimizar el rendimiento operativo de la locomotora antes de la fabricación.

Se ha creado un vídeo donde se muestra el funcionamiento de los diferentes mecanismos del modelo. Para acceder al mismo, mantén la tecla ‘ctrl’ y pulse [aquí](#).

7 ESTUDIO TÉRMICO

El sistema de precalentamiento del agua es una parte crucial en el funcionamiento eficiente de las locomotoras de vapor. Su principal función es aprovechar el calor de los gases de escape de la combustión para aumentar la temperatura del agua de la caldera, mejorando así la eficiencia térmica y reduciendo el tiempo necesario para generar vapor. Esta mejora en la eficiencia no solo contribuye a un mejor rendimiento de la locomotora, sino que también ayuda a reducir el consumo de combustible y las emisiones.

En el contexto de las locomotoras de vapor, donde la eficiencia energética es de suma importancia, el análisis térmico del sistema de precalentamiento del agua permite optimizar su diseño y operación. Este análisis proporciona una comprensión detallada de cómo se distribuye el calor dentro del sistema y cómo se pueden mejorar las condiciones de transferencia térmica.

El objetivo de este estudio es realizar un análisis térmico detallado del sistema de precalentamiento del agua utilizando el software *ANSYS Fluent*. Para llevar a cabo este estudio, se ha desarrollado un modelo geométrico del sistema de precalentamiento, donde se han aplicado condiciones de contorno realistas y se han utilizado propiedades térmicas precisas de los materiales. El análisis se centrará en la distribución de temperatura dentro del sistema, proporcionando una visión completa del comportamiento térmico del mismo.

7.1 Metodología

En los siguientes apartados, se recoge el proceso ejecutado para llevar a cabo el estudio. Dicho proceso comprende desde el modelado del sistema de precalentamiento a tamaño real, hasta la configuración del *software* y la extracción de los resultados.

Para establecer un contexto, el presente estudio se ha realizado considerando condiciones típicas de operación del sistema de precalentamiento de agua de una locomotora, seleccionando parámetros representativos para garantizar un análisis realista. La temperatura inicial del agua se ha fijado en 15°C (288 K), ya que este valor corresponde a una condición habitual en climas templados y refleja la temperatura aproximada del agua almacenada antes de ingresar al sistema de precalentamiento.

Por otro lado, la temperatura del gas caliente de entrada se ha establecido en 500°C (773 K), dado que este valor es característico de los gases de escape en motores diésel de locomotoras, los cuales se utilizan frecuentemente como fuente de energía térmica para calentar el agua en sistemas de recuperación de calor.

Finalmente, se ha considerado una velocidad del gas de 20 m/s, ya que este rango de velocidad es común en los flujos de escape de locomotoras y tiene un impacto significativo en la eficiencia del intercambio térmico. Una velocidad elevada mejora la transferencia de calor por convección, optimizando el proceso de precalentamiento del agua antes de su uso en el sistema de la locomotora. La selección de estos valores permite evaluar con precisión el rendimiento térmico del sistema en un escenario representativo de su operación real.

En los siguientes apartados se recogen dos estudios térmicos: uno en 3D, que permite evaluar la efectividad del sistema, y otro en 2D, que muestra el impacto de diferentes materiales de fabricación de la caldera, comparando una caldera de cobre (alta conductividad térmica) con una de otro material metálico de baja conductividad, como el titanio, para analizar el rendimiento del sistema en diferentes condiciones de transferencia térmica.

7.2 Estudio térmico 3D

7.2.1 Creación del modelo en Catia V5

Para la realización del estudio, se ha modelado el sistema en CATIA V5, diseñando las principales piezas involucradas con la ayuda de los planos originales [1], escalando cada una de las piezas a tamaño real. Este sistema está formado por 3 tubos dispuestos de forma que atraviesan longitudinalmente el tanque de agua, conectando la caja de fuego con la chimenea, por donde circulan los gases calientes de la combustión.

- **Tanque y tuberías (Shell):** Se han modelado como una única pieza, al estar fabricadas del mismo material.

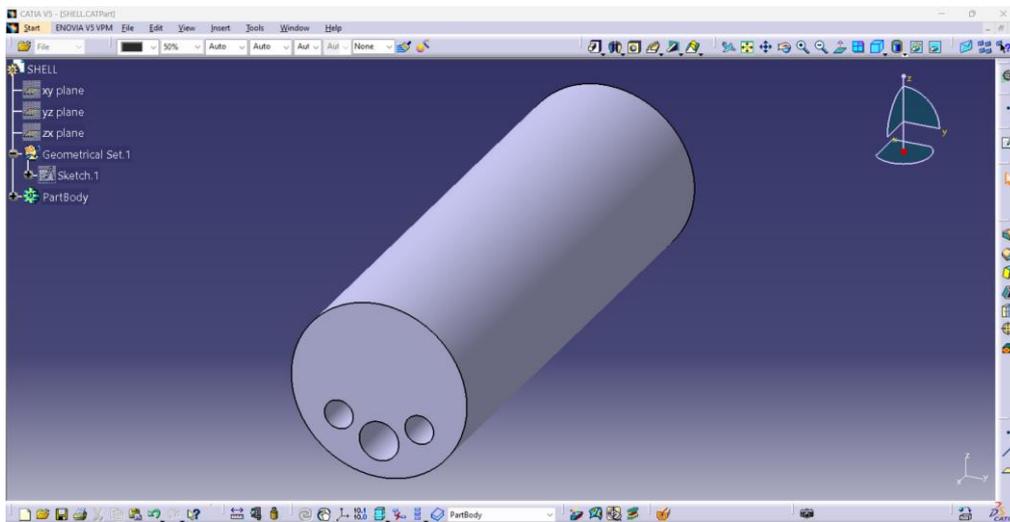


Figura 201. Modelo del tanque y tuberías en CATIA V5

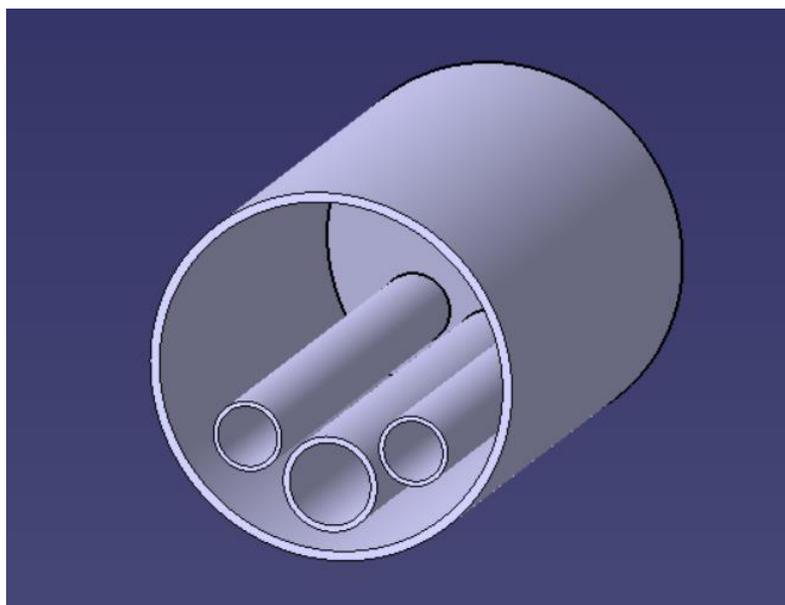


Figura 202. Detalle interior del tanque y tuberías

- **Gas caliente (Hot Fluid):** Se ha generado un volumen representativo del gas caliente a través de las 3 tuberías.

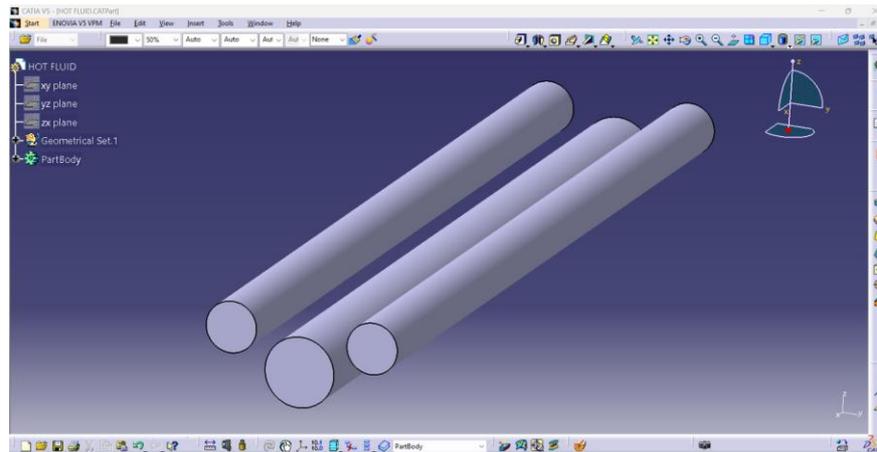


Figura 203. Representación del gas caliente en el modelo

- **Agua (Cold Fluid):** Se ha definido la zona que contiene el agua dentro del sistema.

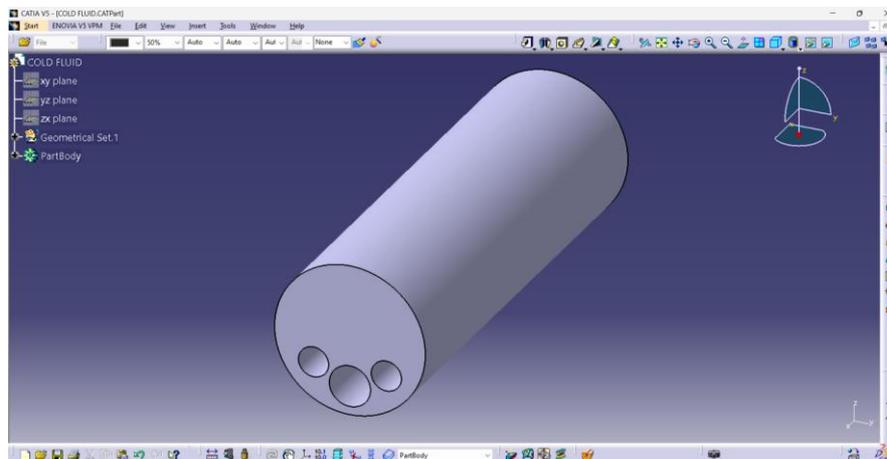


Figura 204. Representación del agua en el modelo

- **Modelo ensamblado:** Se han integrado todas las partes en un ensamblaje final.

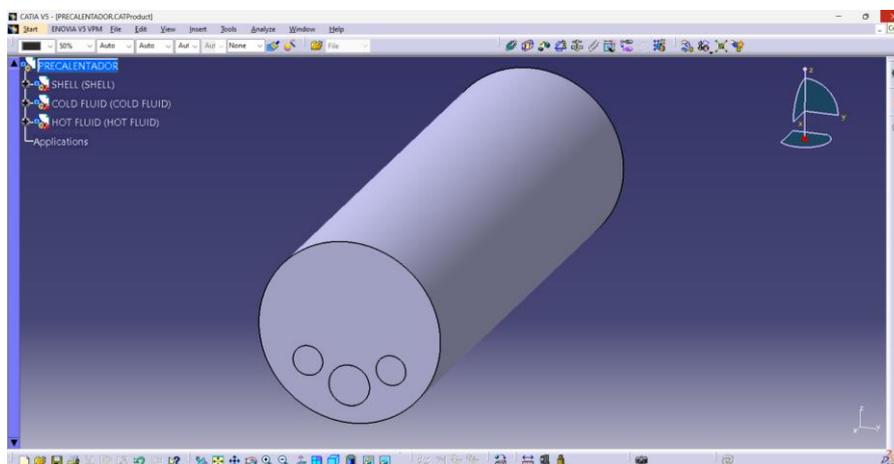


Figura 205. Modelo ensamblado en CATIA V5

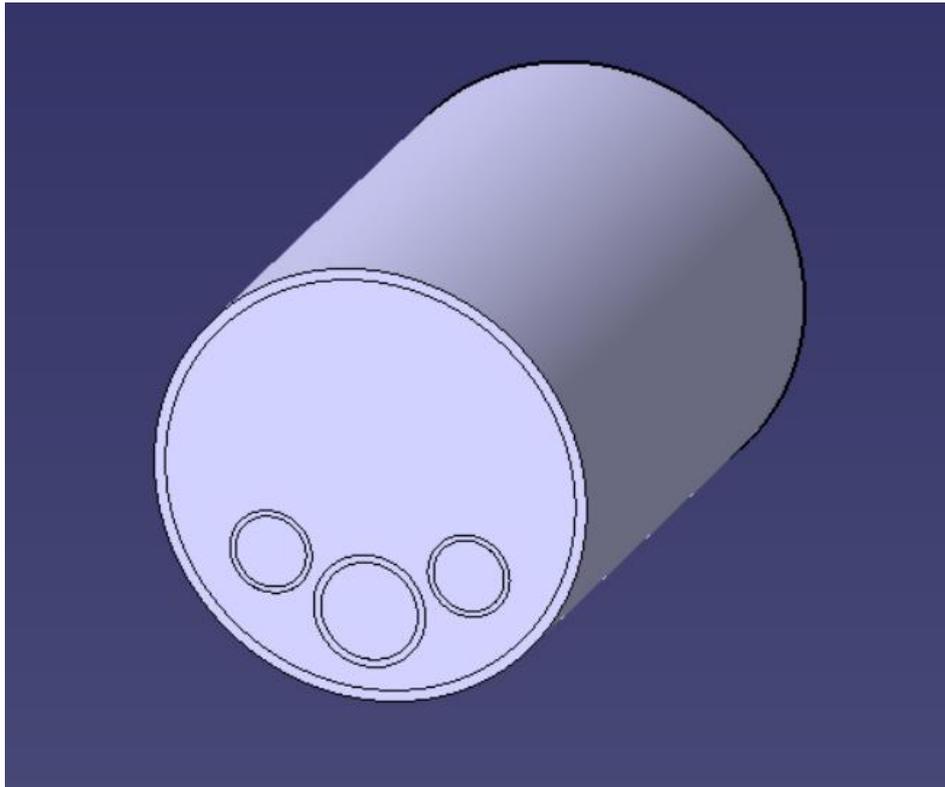


Figura 206. Vista interior del modelo ensamblado

Antes de proceder con la simulación en ANSYS, el modelo debe exportarse en formato **.STP** para su posterior importación.

7.2.2 Creación del proyecto y módulo *Geometry*

Para comenzar con el estudio, lo primero que se debe hacer es crear un proyecto nuevo en el *software*. Este proceso empieza ejecutando Ansys en modo administrador, lo cual permite que el programa acceda a todos los recursos necesarios del sistema de manera óptima.

Una vez dentro del programa, el primer paso en ANSYS Workbench es abrir el módulo *Geometry*, donde se importa el modelo previamente generado en CATIA V5. Una vez cargado el modelo, se debe editar para corregir su orientación y realizar las modificaciones necesarias. Al hacer clic derecho sobre *Geometry*, se elige la opción "*Edit Geometry in DesignModeler*". Esta acción abrirá el modelo en el entorno de *Design Modeler*.

7.2.2.1 Corrección de Orientación

Al importar el modelo en ANSYS, es habitual que aparezca girado, por lo que es necesario aplicar una rotación de 90 grados para posicionarlo correctamente en el sistema de coordenadas.

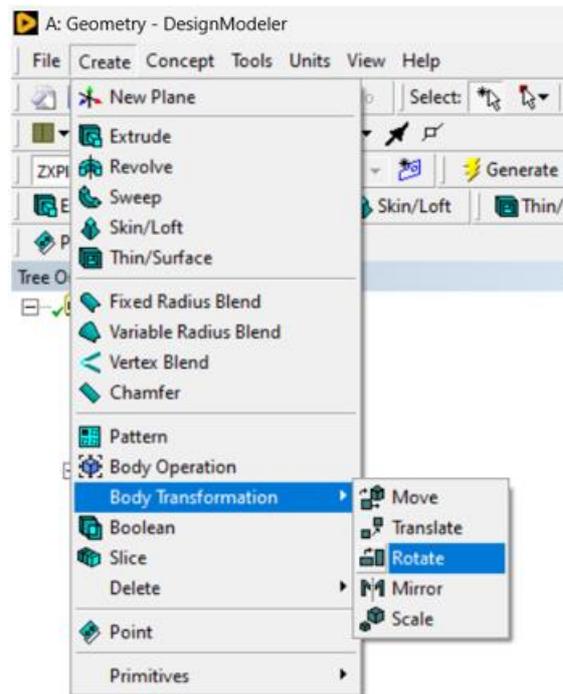


Figura 207. Aplicación de la rotación de 90° en ANSYS

Además, es fundamental seleccionar todas las partes y combinarlas en una sola entidad mediante la opción "*Form New Part*".

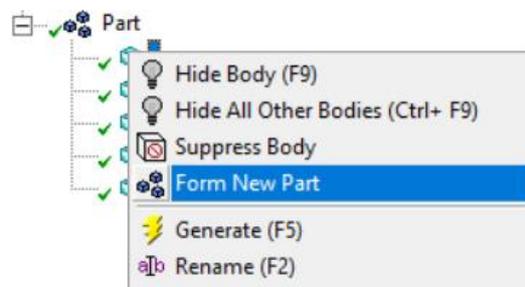


Figura 208. Creación de única entidad con *Form New Part*

Posteriormente, se deben definir las regiones fluidas y sólidas del modelo para garantizar que el software las reconozca correctamente en la simulación.

- **Región sólida:** Estructura fija del tanque y tuberías.
- **Regiones fluidas:** Zonas donde circula el gas caliente y el agua.

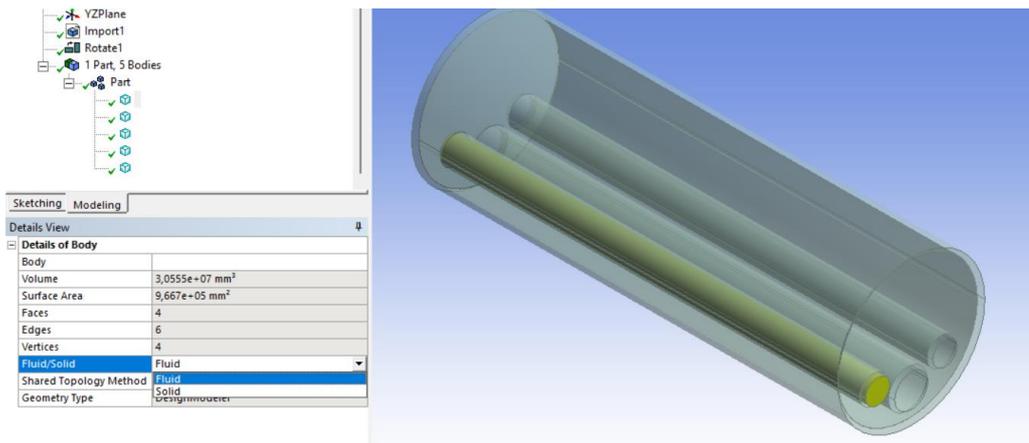


Figura 209. Definición de las regiones fluidas y sólidas en ANSYS

De esta manera, se crea el modelo para el estudio, el cual contiene 1 cuerpo sólido (1 carcasa + 3 tuberías) y 4 volúmenes fluidos (1 para el agua y 3 para el gas de combustión).

7.2.3 Módulo Mesh

Una vez que se ha preparado el modelo, se regresa a la página de inicio del proyecto en ANSYS. Desde allí, se procede a conectar el módulo *Geometry* con el módulo *Mesh*. Esto se hace seleccionando el módulo *Geometry* y arrastrándolo hasta el módulo *Mesh*. Esta conexión permite que el modelo geométrico previamente preparado se transfiera correctamente al módulo de *Mesh*, donde se llevará a cabo el mallado detallado que es fundamental para el análisis térmico posterior.

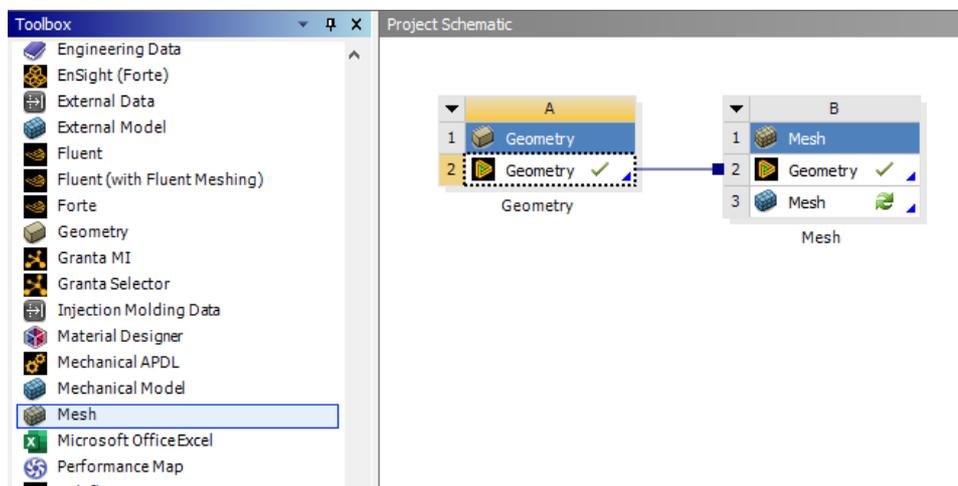


Figura 210. Conexión del módulo *Mesh*

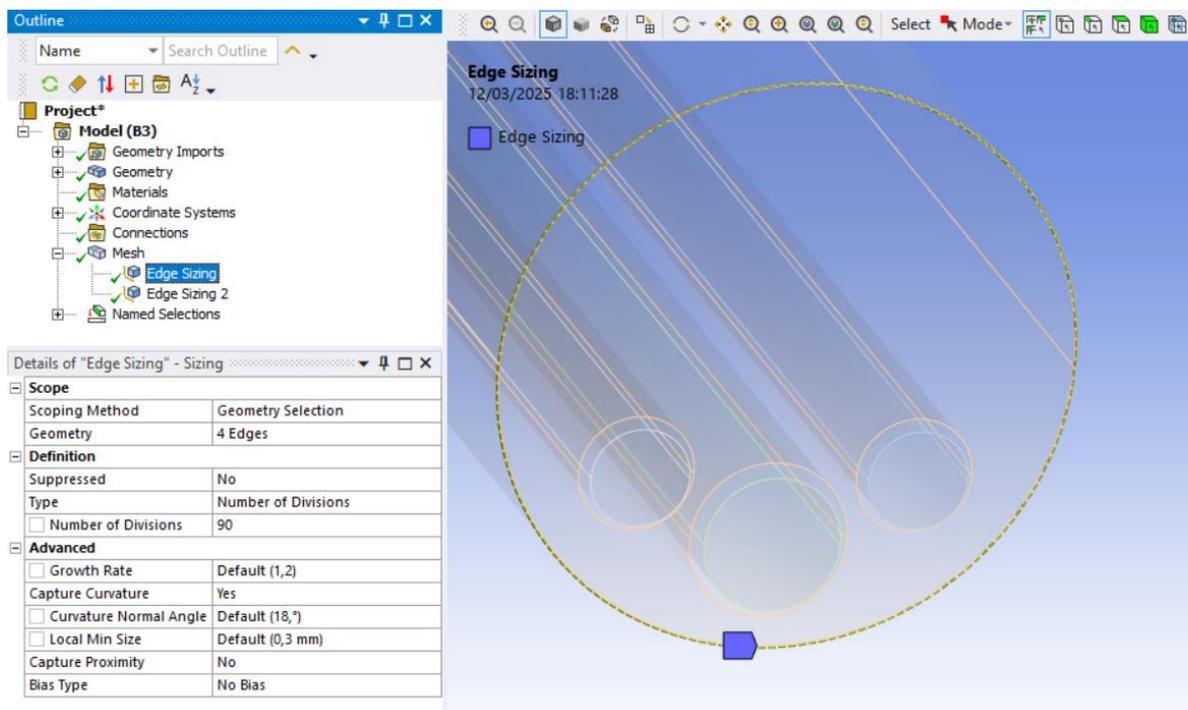
7.2.3.1 Configuración de la malla

Dentro del módulo *Mesh*, se configuran las preferencias físicas para CFD seleccionando *Physics Preference*. Se ajusta el tamaño de los elementos (*element size*) para capturar detalles adecuadamente sin aumentar la carga computacional. Además, se establece el *smoothing* en *high* para mejorar la calidad de la malla dentro de las limitaciones de la versión de estudiantes, asegurando una distribución óptima de elementos que permita obtener resultados precisos en el análisis.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Element Size	30, mm
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
<input type="checkbox"/> Max Size	40, mm
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0,15 mm)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (0,3 mm)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	18,°
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	2561,9 mm
Average Surface Area	7,7321e+005 mm ²
Minimum Edge Length	204,2 mm

Figura 211. Configuración del mallado

El siguiente paso es añadir *Sizing* (dimensiones específicas) en ciertos bordes, fijando el número de divisiones. Esto se realiza para asegurar que la malla tenga una resolución adecuada en áreas críticas, como los bordes de los tubos, donde se espera que ocurran gradientes significativos de temperatura o flujo. Al aplicarlos, se garantiza una captura precisa de los fenómenos físicos relevantes, contribuyendo así a obtener resultados precisos y confiables.

Figura 212. *Sizing* en el borde del dominio del agua

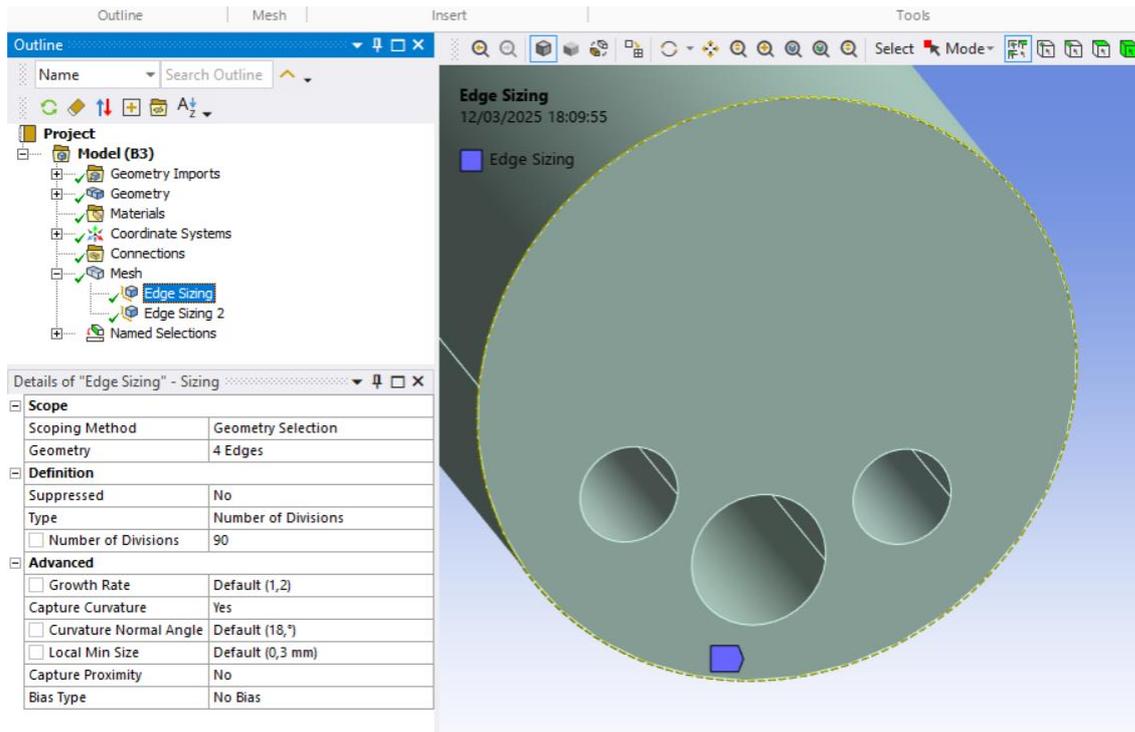


Figura 213. *Sizing* en el borde del dominio del tanque

Este primer *sizing*, mostrado en las dos figuras anteriores, permite dividir de manera precisa los bordes más grandes del sistema.

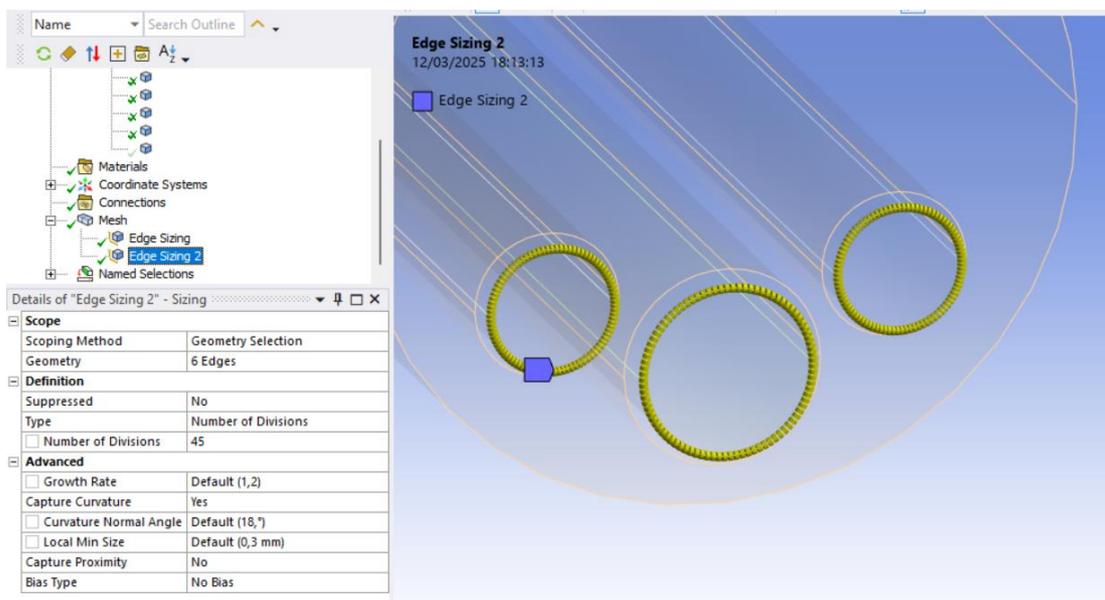


Figura 214. *Sizing* en el borde del dominio del gas caliente

Una vez configuradas todas las especificaciones, se procede a finalizar el proceso de mallado pulsando sobre el botón *Mesh* y seleccionando *Generate*. Este paso genera la malla final basada en todas las configuraciones previamente establecidas. A continuación, se muestran imágenes de la malla final:

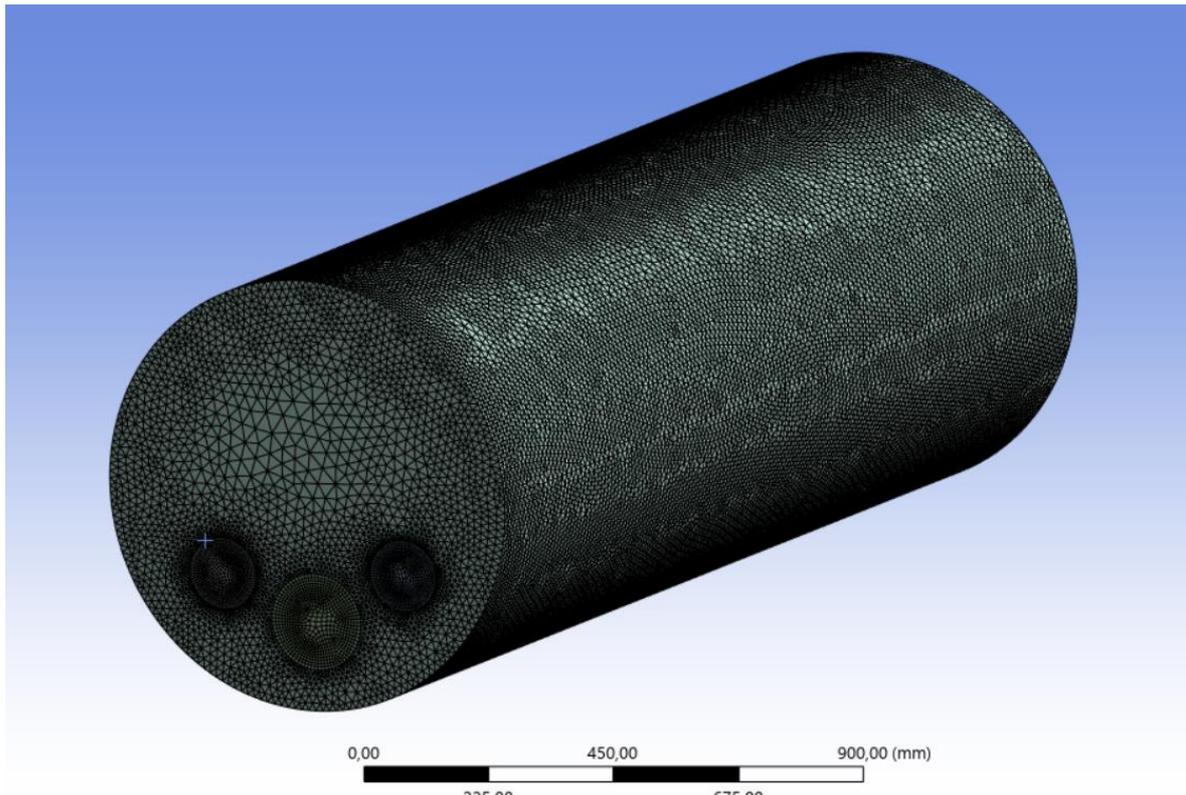


Figura 215. Modelo completo mallado

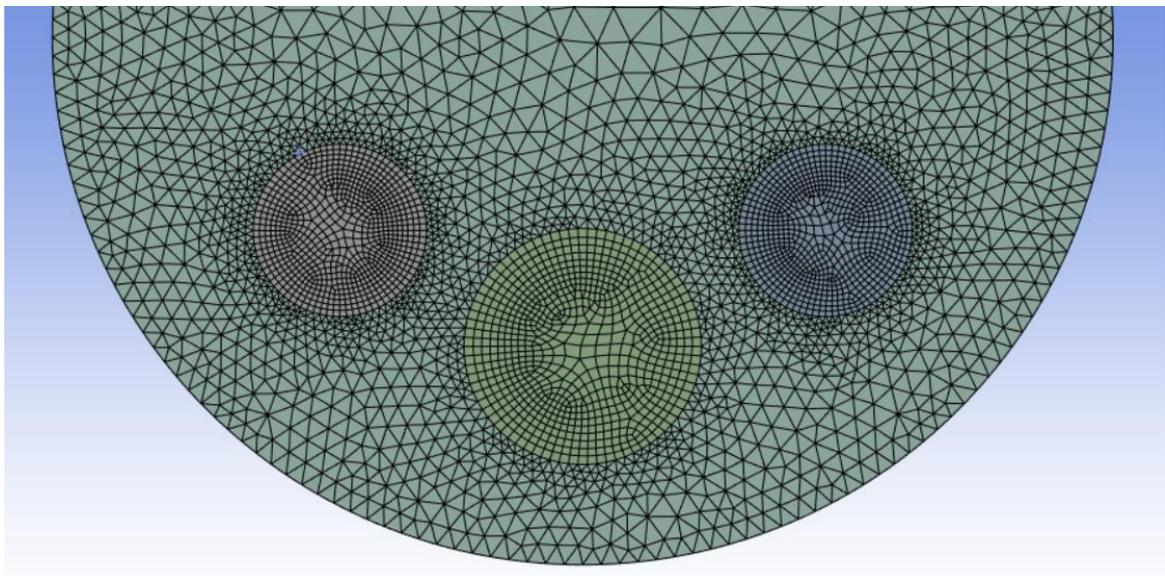


Figura 216. Modelo completo mallado (detalle)

De igual manera, ocultando el dominio sólido, el mallado interior es el siguiente:

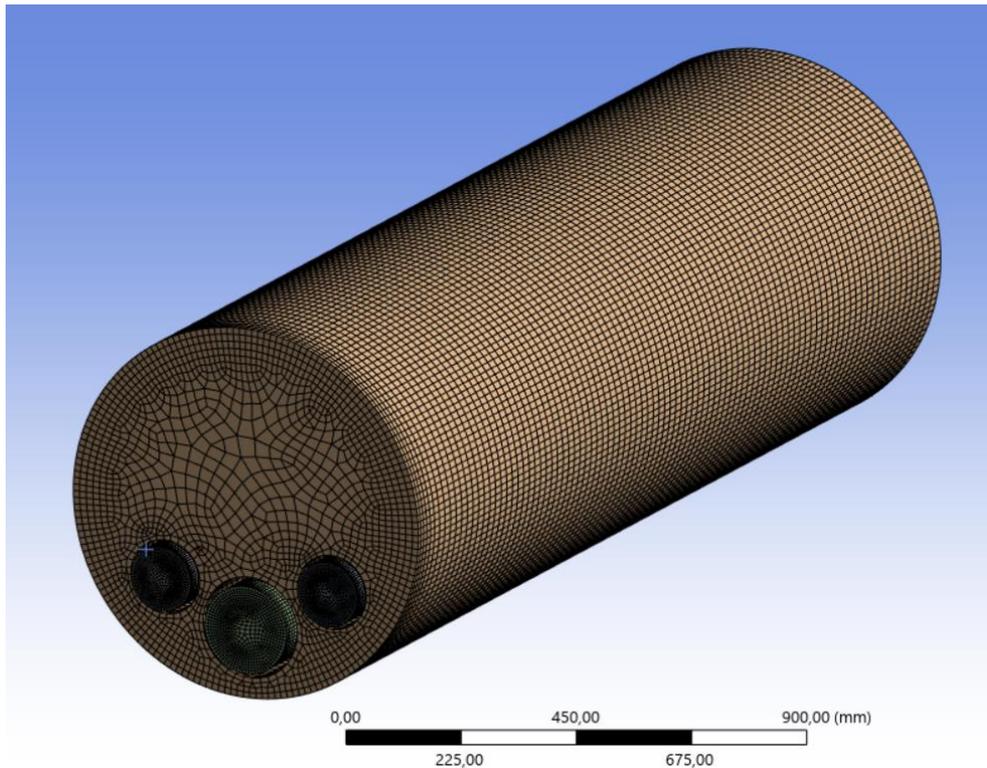


Figura 217. Modelo fluido mallado

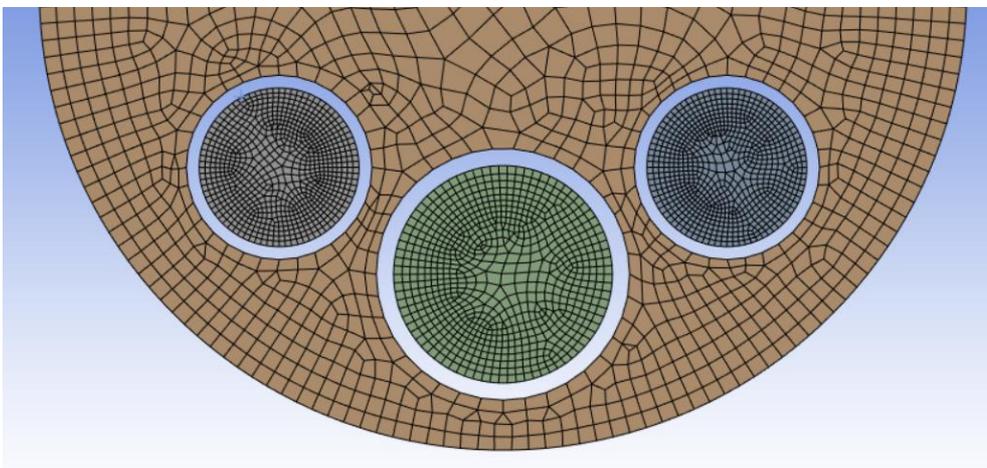


Figura 218. Modelo fluido mallado (detalle)

Después de generar la malla, es esencial verificar en la opción "*Statistics*" que el número total de elementos no exceda el límite establecido de un millón de elementos para la versión de estudiantes. Esto asegura que la simulación se mantenga dentro de los parámetros permitidos, permitiendo ajustes adicionales en la configuración de la malla si es necesario para cumplir con este requisito.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	527024
<input type="checkbox"/> Elements	996202

Figura 219. Comprobación de *Statistics*

Antes de proseguir, es aconsejable comprobar la calidad de la malla. Para ello, basta con comprobar los siguientes parámetros:

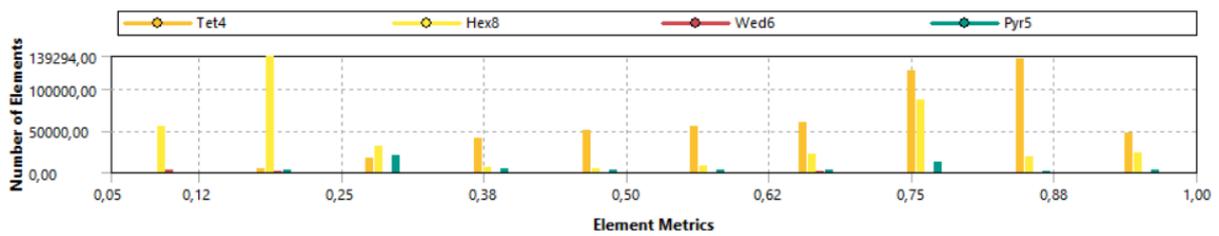


Figura 220. *Element Quality*

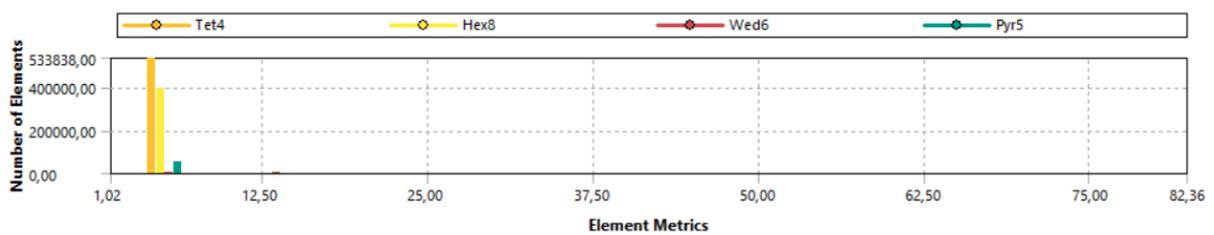


Figura 221. *Aspect Ratio*

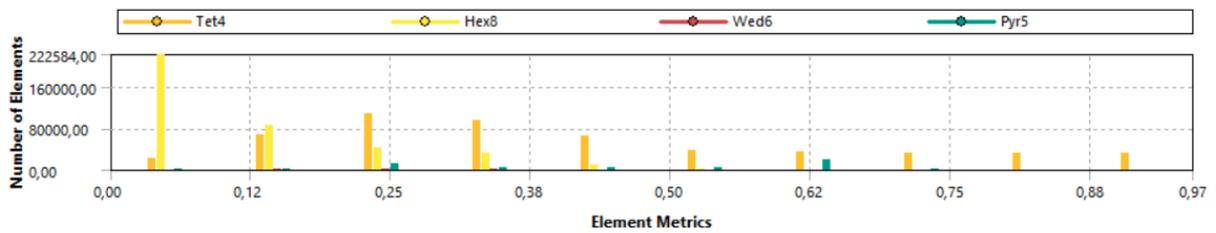


Figura 222. *Skewness*

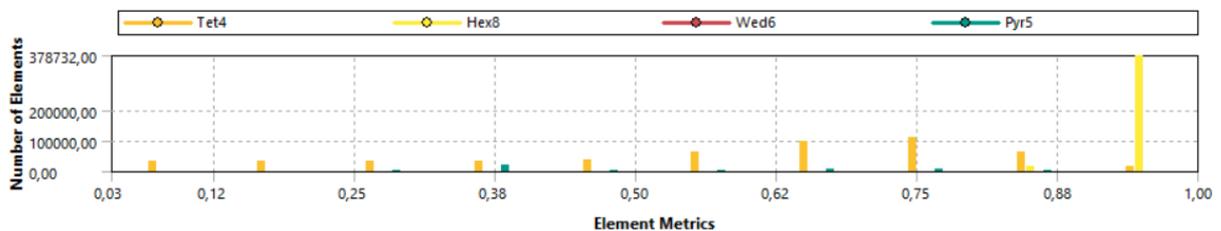


Figura 223. *Orthogonal Quality*

Los gráficos de barra proporcionados permiten evaluar la calidad de la malla en términos de la distribución de elementos y sus características geométricas. A partir de estos gráficos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El *Element Quality* se refiere a qué tan bien se ajusta la celda al modelo geométrico. Un valor cercano a 1 implica una celda bien formada, sin distorsiones significativas.

- Un *Aspect Ratio* cercano a 1 indica que las celdas tienen una forma cúbica o esférica. Esto es favorable, ya que las celdas con un aspecto muy alto (casi lineales) pueden generar problemas de convergencia.
- La *Skewness* mide cómo de distorsionadas están las celdas. Un valor de *skewness* cercano a 0 significa que las celdas tienen formas más regulares, lo que facilita las soluciones numéricas.
- Un valor de *Orthogonal Quality* cercano a 1 indica que las celdas de la malla están bien alineadas con las direcciones de la geometría, lo que minimiza el error en los cálculos numéricos.

Con base en este análisis, se concluye que la malla generada es de buena calidad, permitiendo obtener resultados confiables.

El último paso en el módulo *Mesh* es la creación de *named selections* (selecciones nombradas). Estas selecciones permiten etiquetar áreas específicas de la malla, como entradas, salidas y paredes internas del sistema. Al asignar nombres descriptivos (*inlet*, *outlet*, *wall*...) a estas selecciones, se facilita la aplicación precisa de condiciones de contorno durante el análisis térmico.

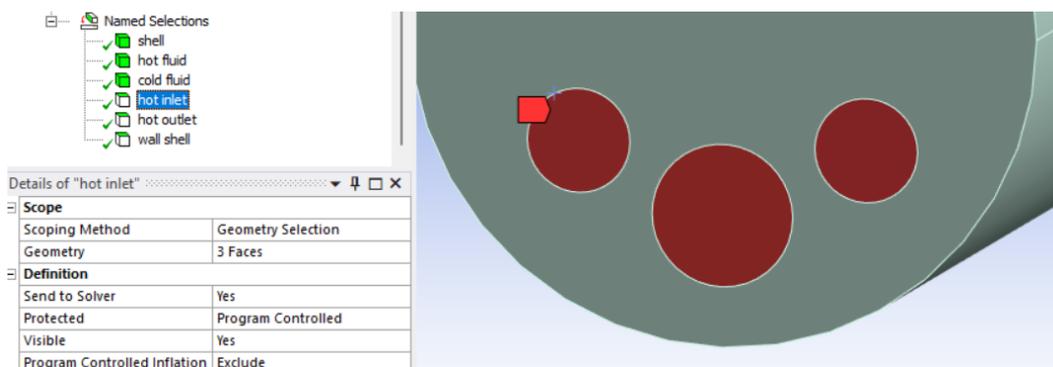


Figura 224. Aplicación de los *Named Selections*

7.2.4 Módulo Fluent

Una vez finalizada la configuración del mallado, se procede a regresar a la página principal del proyecto para conectar el módulo *Fluent* e iniciar el análisis térmico. Esto se realiza seleccionando el módulo *Fluent* y estableciendo la conexión desde la interfaz principal de ANSYS, lo que permite transferir el modelo geométrico mallado y las *named selections* preparadas para la simulación.

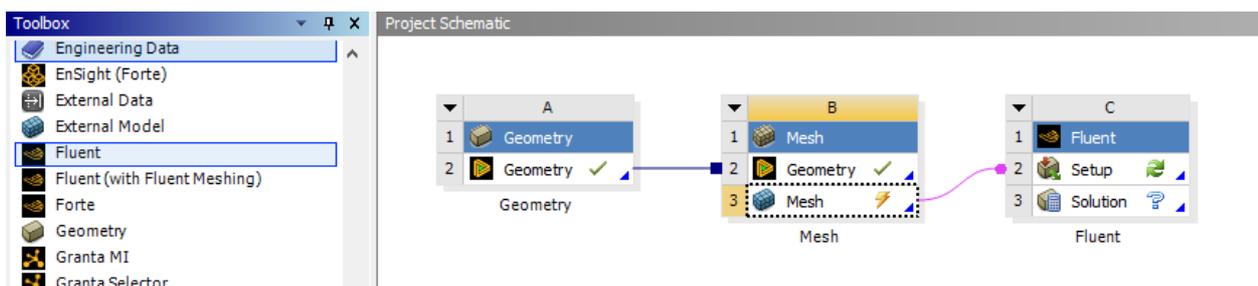


Figura 225. Conexión del módulo *Fluent*.

7.2.4.1 Configuración del método

Para configurar el módulo *Fluent*, accedemos al mismo indicando *Double Precision* y el número de núcleos de procesamiento (CPU) que se asignarán para las tareas del software, tal y como se puede apreciar en la Figura 213. Este paso es importante para optimizar el rendimiento y reducir los tiempos de simulación, especialmente en sistemas de múltiples núcleos.

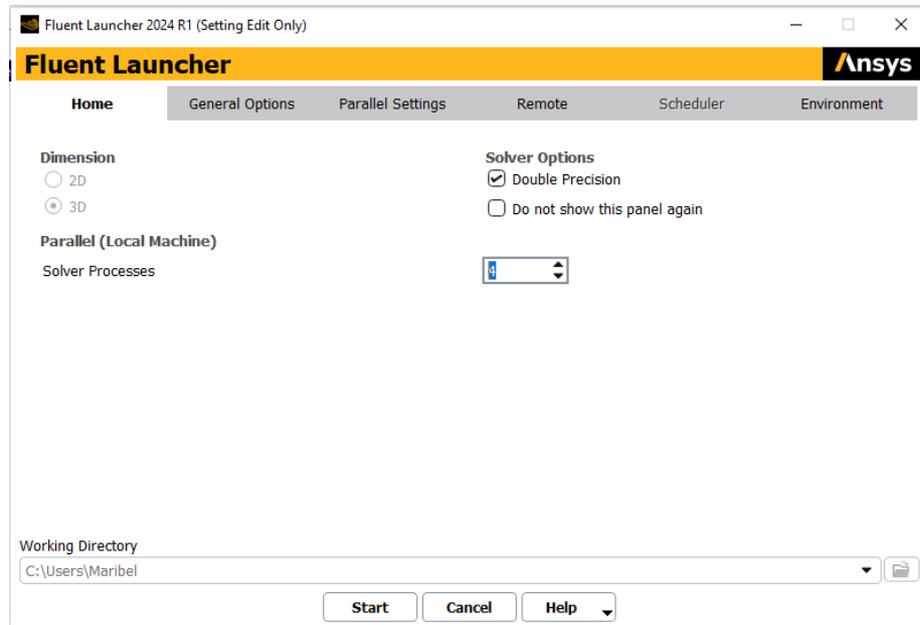


Figura 226. Configuración de acceso al módulo *Fluent*

Una vez dentro, se puede observar una visión general del conjunto que se va a estudiar. Es importante comprobar que las entradas y salidas de flujo están bien definidas. De no ser así, se debe volver al módulo *mesh* y corregir los *Named Selections*.

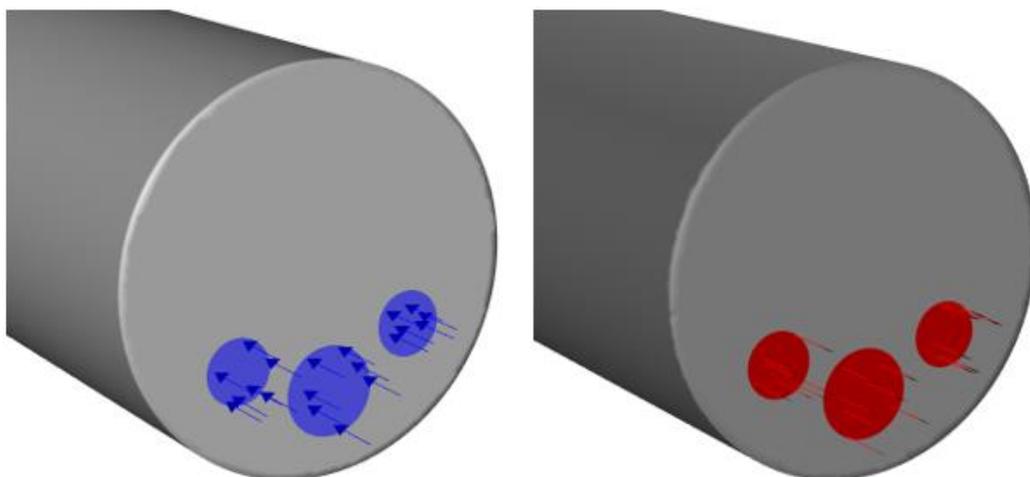


Figura 227. Entradas y salidas de flujo en el modelo

Seguidamente, se establecen las ecuaciones y métodos que se emplean para la resolución. Es imprescindible resolverlo como un problema transitorio (*Transient*), ya que se trata de un proceso de calentamiento, no buscamos que converja hasta una solución estable.

Por otro lado, es conveniente activar la gravedad y fijarla en la dirección correcta, para poder capturar los posibles efectos de la convección natural.

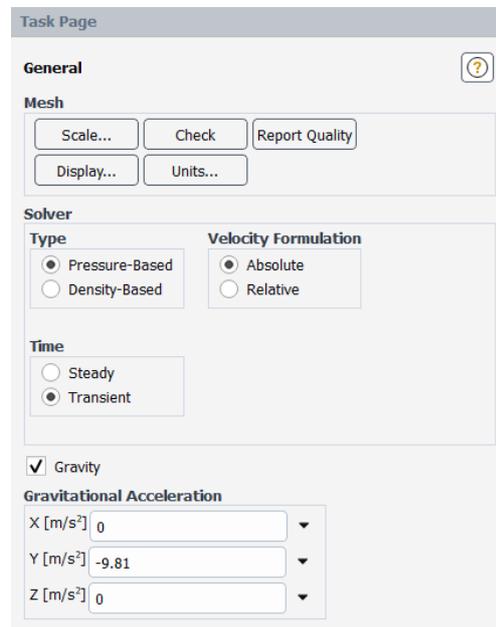


Figura 228. Activación de *Transient* y fijación de la gravedad

Para este estudio, se ha activado la ecuación de la energía y se ha establecido el método *K-omega* para el modelo viscoso. Véase la Figura 213.

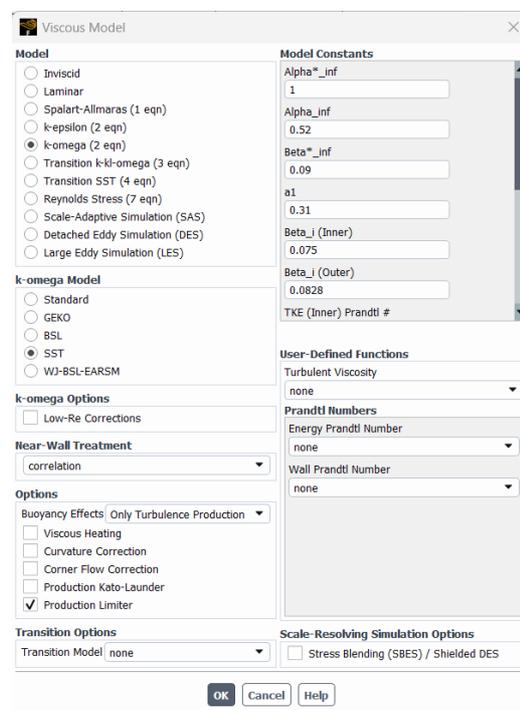


Figura 229. Configuración del modelo viscoso

A continuación, se definen los materiales del problema. Para ello, se accede a la pestaña *Materials* y, entrando en la base de datos del software, se escoge *Liquid-water* y se clicca en *Copy* para copiar

sus propiedades. Tras este proceso, aparece el agua líquida dentro de los materiales fluidos disponibles. De manera similar, se crea el fluido caliente de estudio. En este caso, las propiedades de los gases de combustión del carbón no aparecen en la base de datos, por lo que se han obtenido de la siguiente manera:

- Se supone que el gas de escape es una mezcla de:

N_2 (75%) , CO_2 (12%) , H_2O (10%) y O_2 (3%)

Para calcular las propiedades promedio del gas, se usa la siguiente ecuación de mezcla ponderada:

$$\phi_{mezcla} = \sum (X_i \cdot \phi_i)$$

donde

- X_i es la fracción molar de cada componente.
- ϕ_i es la propiedad de cada gas (densidad, viscosidad, calor específico o conductividad térmica).

- Los valores tabulados de cada gas a 773 K (500 °C) son:

Tabla 3. Valores tabulados de gases a 773K

Gas	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m·s)	C _p (J/kg·K)	Conductividad (W/m·K)
N₂ (75%)	0.418	3.62×10^{-5}	1060	0.044
CO₂ (12%)	0.555	4.14×10^{-5}	1100	0.051
H₂O (10%)	0.320	1.10×10^{-5}	2020	0.026
O₂ (3%)	0.494	3.76×10^{-5}	1080	0.048

- Aplicando la ecuación de mezcla para cada propiedad:

$$\rho_{mezcla} = (0.75 \times 0.418) + (0.12 \times 0.555) + (0.10 \times 0.320) + (0.03 \times 0.494) = 0.427 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{mezcla} = ((0.75 \times 3.62) + (0.12 \times 4.14) + (0.10 \times 1.10) + (0.03 \times 3.76)) \times 10^{-5} = 3.43 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

$$C_p = (0.75 \times 1060) + (0.12 \times 1100) + (0.10 \times 2020) + (0.03 \times 1080) = 1161 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$k_{mezcla} = (0.75 \times 0.044) + (0.12 \times 0.051) + (0.10 \times 0.026) + (0.03 \times 0.048) = 0.0432 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Por lo que, las propiedades para el gas de combustión son:

- Densidad = 0.427 kg/m³
- C_p = 1161 J/(kg·K)
- Conductividad térmica = 0.0432 W/(m·K)
- Viscosidad = $3.43 \cdot 10^{-5}$ kg/(m·s)

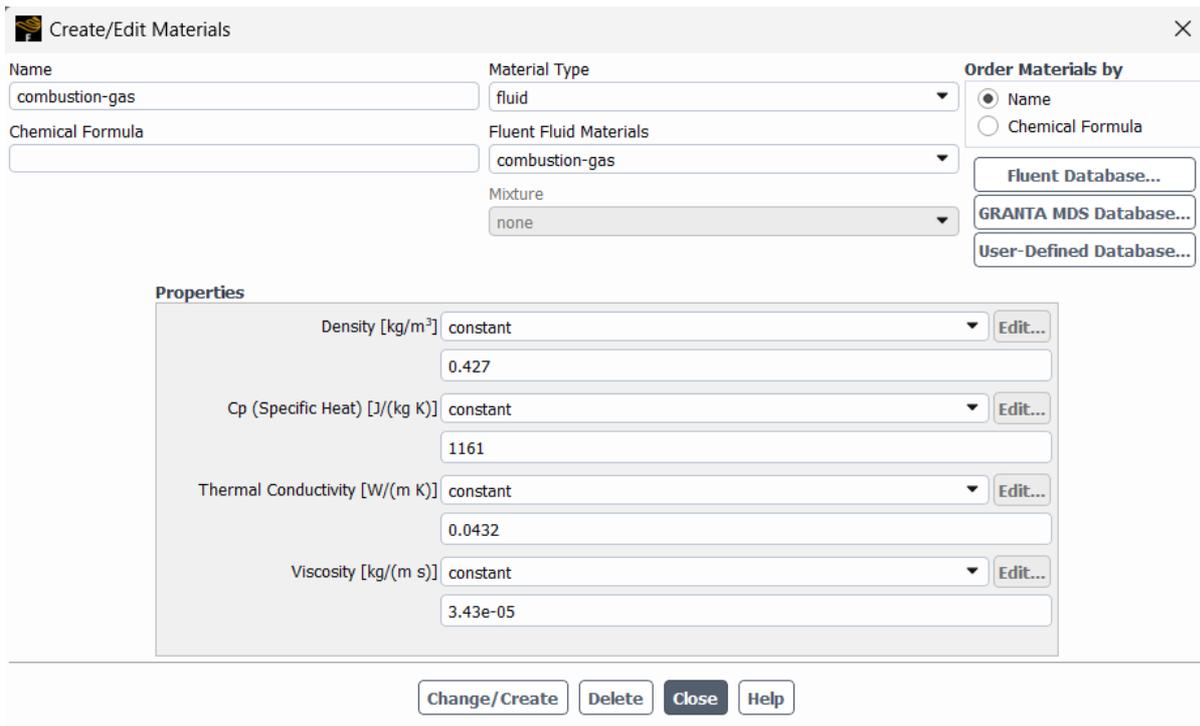


Figura 230. Creación del material “*Combustion gas*”

Una vez definidos los materiales, se fijan las *Cell Zone Conditions*.

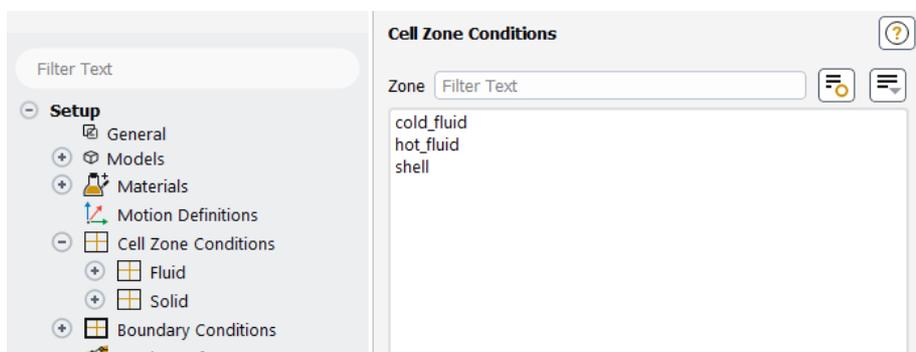


Figura 231. Fijación de las *Cell Zone Conditions*

Dentro de los dominios fluidos, se debe establecer el agua líquida para el fluido frío, y el gas de combustión para el caliente.

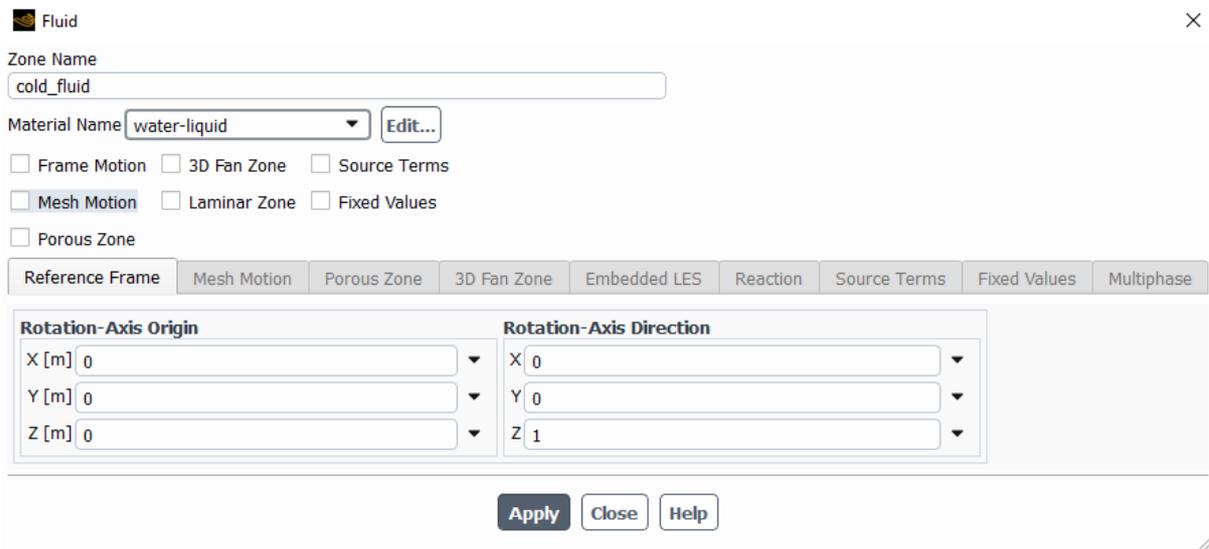


Figura 232. Asignación del agua como fluido frío

En cuanto a el dominio sólido (tuberías + carcasa de la caldera), se sustituye el material aluminio que viene por defecto, por el cobre creado anteriormente.

A continuación, se definen las *Boundary Conditions*, siendo únicamente necesario modificar las condiciones del fluido de entrada (*hot_inlet*) y cambiar el material del dominio sólido.

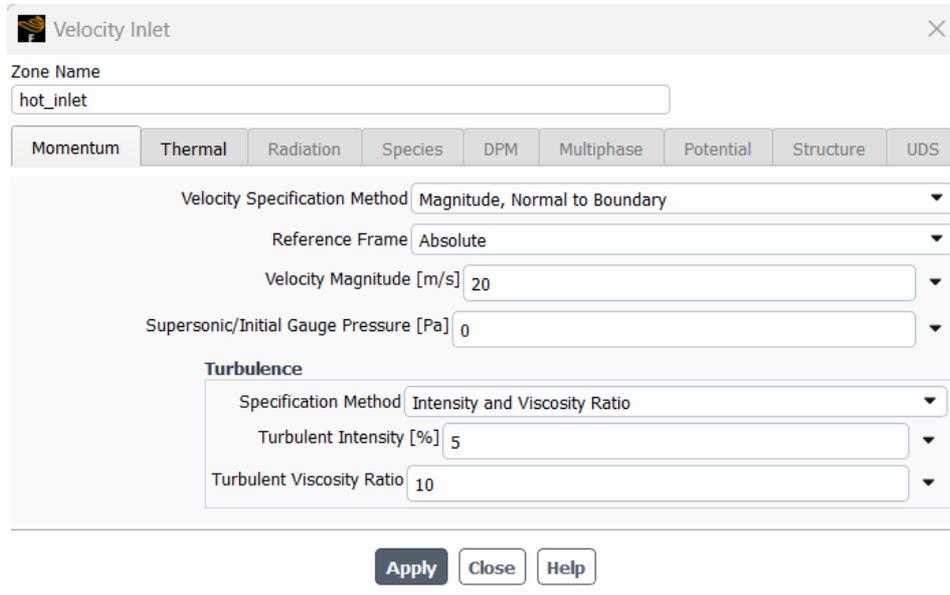


Figura 233. Definición de las *Boundary Conditions*

Se fija una velocidad de 20 m/s, tal y como se introdujo al principio del capítulo.

En el caso de las entradas calientes, se fija 773 K (500 °C) como la temperatura de los gases a la entrada del sistema. Dicho valor se ha fijado teniendo en cuenta el valor típico de la temperatura de combustión del carbón en las locomotoras, pudiendo superar los 1000 °C en ciertos casos.

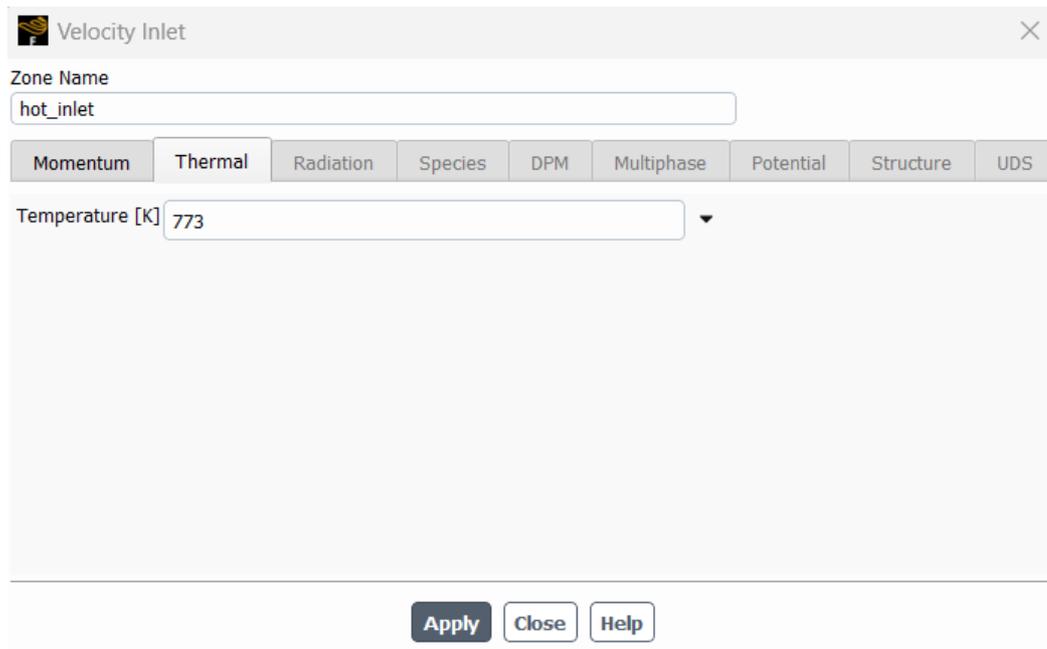


Figura 234. Fijación de la temperatura de entrada del fluido caliente

Por otro lado, se cambia el material de las paredes de las tuberías, pasando del aluminio, que viene por defecto, al cobre, y se establece *Coupled* como condiciones térmicas en las interfaces del conjunto.

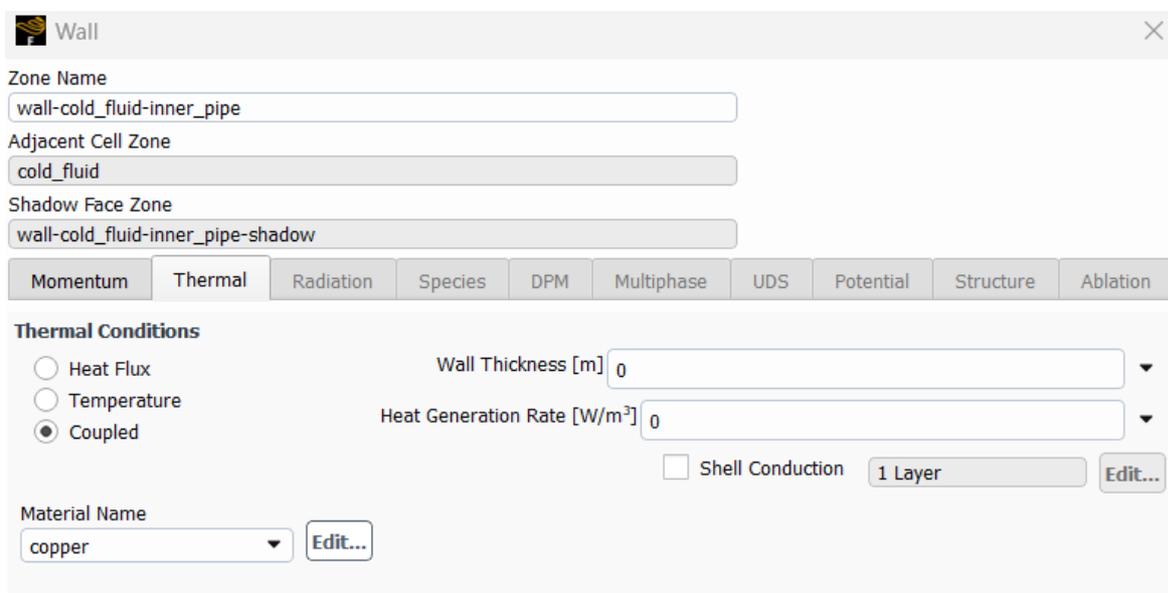


Figura 235. Cambio del material y selección de condición térmica en interfaces

En el caso de las paredes externas, la condición térmica es *Heat Flux*, con un valor de 0 W/m^2 , tal y como se muestra en la Figura 236. De esta manera se fija que no haya pérdidas de calor hacia el ambiente, lo que simplifica el problema.

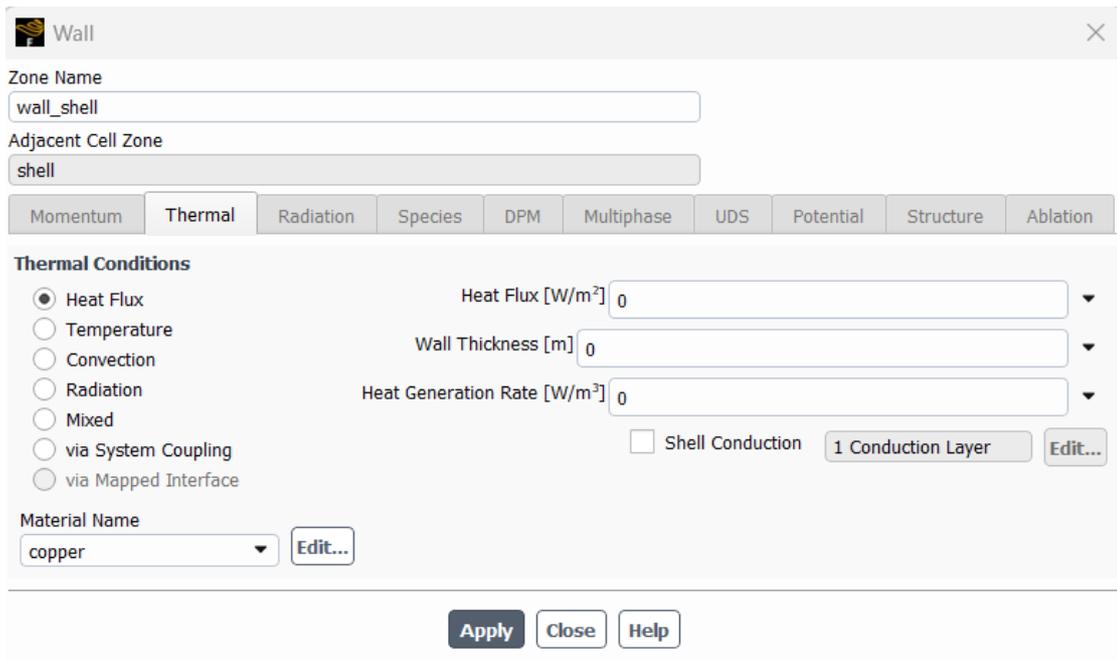


Figura 236. Cambio del material y selección de condición térmica en caras externas

Seguidamente, se establece el método de resolución. Para ello, se fija *Scheme* en *Coupled*, y *Second Order* en todas las *Spatial Discretization*.

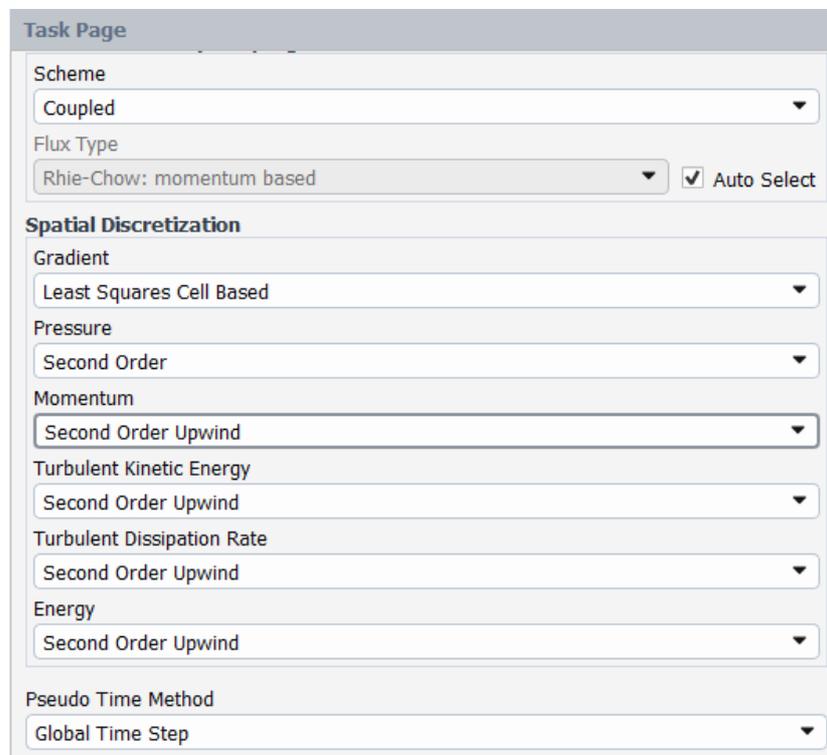


Figura 237. Configuración del método de resolución

Para finalizar, se inicializa el problema por el método estándar, partiendo de los valores de todo el conjunto (*all-zones*) con una temperatura de 15 °C (288 K).

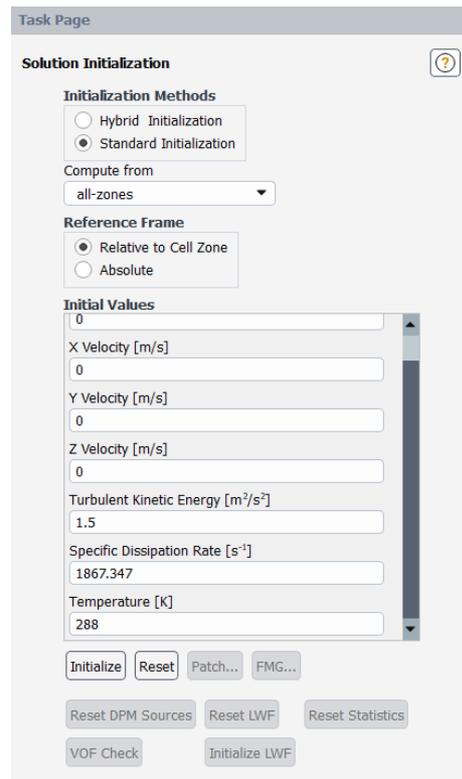


Figura 238. Inicialización estándar de todo el conjunto en 15 °C

Una vez que se ha inicializado el problema, se pueden crear los contornos deseados. Para ello, dentro de *Solution* > *Calculation Activities*, se encuentra la opción *Solution Animations*, la cual permite generar las visualizaciones de la solución. Esta opción permite crear planos y contornos con diferentes colores, y ofrece la posibilidad de seleccionar la variable que se desea representar, configurar la escala de colores y ajustar diversas opciones adicionales.

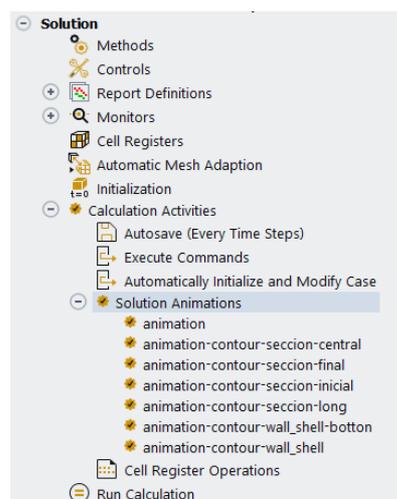


Figura 239. Creación de animaciones de contornos de temperatura

Por último, en la pestaña *Run Calculation* se fija el tamaño del paso de tiempo (*Time Step Size*) en 5 segundos, el máximo de iteraciones por cada cálculo (*Max Iteratios/Time Step*) en 10 y una cantidad de pasos de tiempo (*Number of Time Step*) lo suficientemente grande como para que dé tiempo a

resolver el problema. En este caso, se prevé que se alcanzarán los resultados buscados en pocas horas.

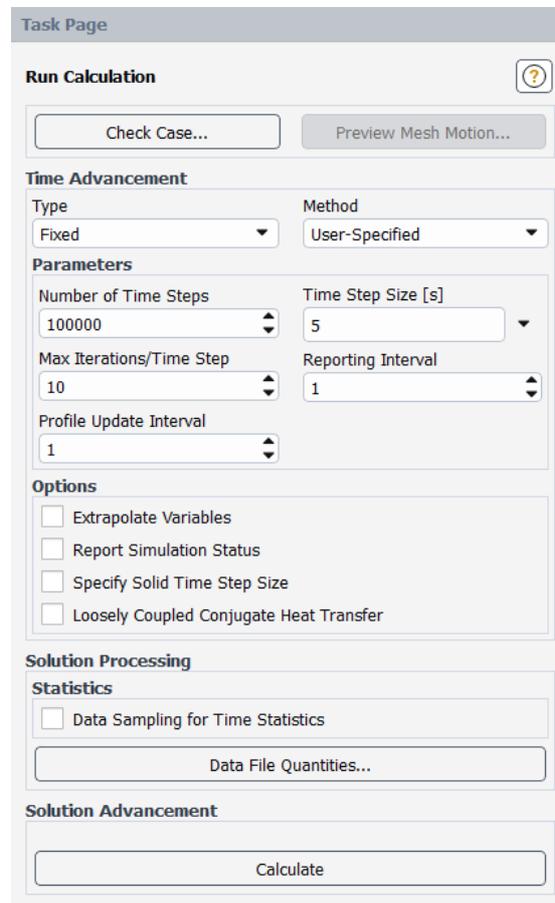


Figura 240. Configuración del tiempo de cálculo

El último paso es lanzar la simulación y esperar a obtener los resultados.

7.3 Estudio térmico 2D

En este apartado, se recoge el segundo estudio térmico que, como se indicó en el apartado 7.1, se corresponde con un estudio en 2 dimensiones.

Se ha trabajado con una sección transversal del sistema, lo que permite analizar en detalle la influencia de la geometría en la distribución térmica.

Al tratarse de un problema más simplificado y menos exigente computacionalmente, se ha empleado para realizar el estudio para dos materiales distintos. Esto permite evaluar el impacto que tienen las propiedades térmicas de cada material en la distribución del calor, proporcionando información valiosa para la selección de materiales en futuras aplicaciones.

7.3.1 Creación del modelo

En este caso, el modelo térmico bidimensional no se ha desarrollado utilizando CATIA, sino que se ha optado por diseñarlo directamente dentro del entorno de ANSYS, facilitando la compatibilidad con los módulos de mallado y análisis, optimizando el flujo de trabajo y reduciendo posibles problemas de importación de geometrías.

Para ello, dentro del mismo archivo de trabajo que en el estudio 3D, se selecciona de nuevo el bloque *Geometry*, y haciendo clic derecho sobre el mismo, se accede a *New DesignModeler Geometry*, lo que permite trabajar en dicho entorno de modelado.

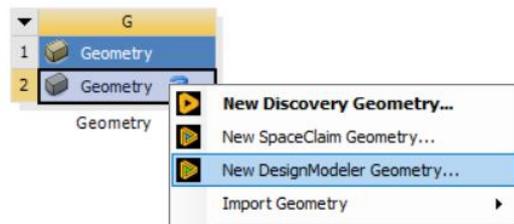


Figura 241. Apertura *DesignModeler Geometry*

Una vez dentro, se emplean diversas herramientas para la creación de modelo:

- *Sketch*: permite diseñar y editar geometrías 2D de forma precisa.



Figura 242. Opción *Sketch*

- *Surface from Sketches* : permite generar superficies a partir de bocetos 2D, convirtiendo los contornos creados en *Sketch* en superficies, facilitando la asignación de materiales y la generación de la malla.

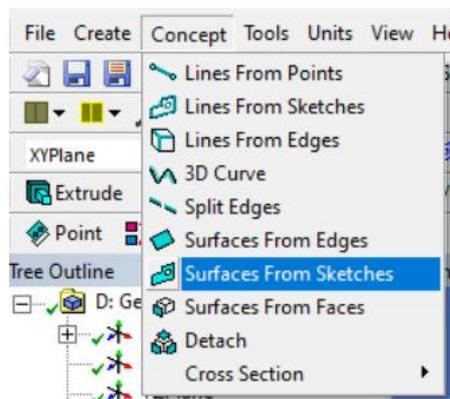


Figura 243. Opción *Surfaces From Sketches*

- *Boolean*: permite realizar operaciones como unión, sustracción e intersección entre diferentes cuerpos, facilitando la creación de modelos complejos a partir de formas más simples.

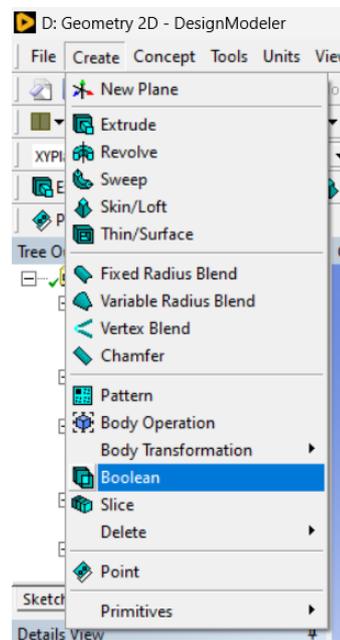


Figura 244. Herramienta *Boolean*

Combinando dichas herramientas, se ha logrado modelar de manera precisa la sección transversal a estudiar. Como resultado, la sección de estudio está formada por ocho superficies, tal y como se puede observar en la Figura 245.

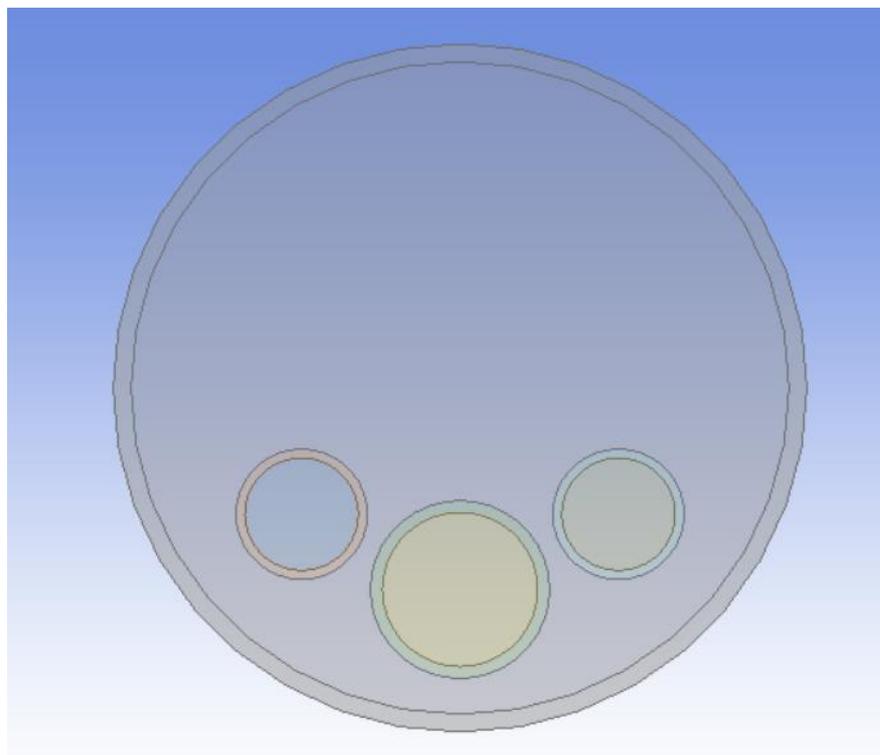


Figura 245. Sección 2D modelada

Al igual que en el estudio anterior, se emplea la herramienta *Form New Part* para garantizar que el modelo funcione correctamente. Esto es fundamental para evitar problemas en la asignación de materiales y en el mallado, asegurando la continuidad térmica entre las diferentes regiones. Al aplicar esta herramienta, las ocho superficies que conforman la sección transversal se comportan como un solo cuerpo.

7.3.2 Módulo *Mesh*

En este estudio, se han aplicado los siguientes métodos:

- *Edge Sizing*: Permite controlar el número de divisiones en aristas específicas, refinando la malla en zonas clave para mejorar la precisión del análisis sin aumentar excesivamente el número total de elementos.

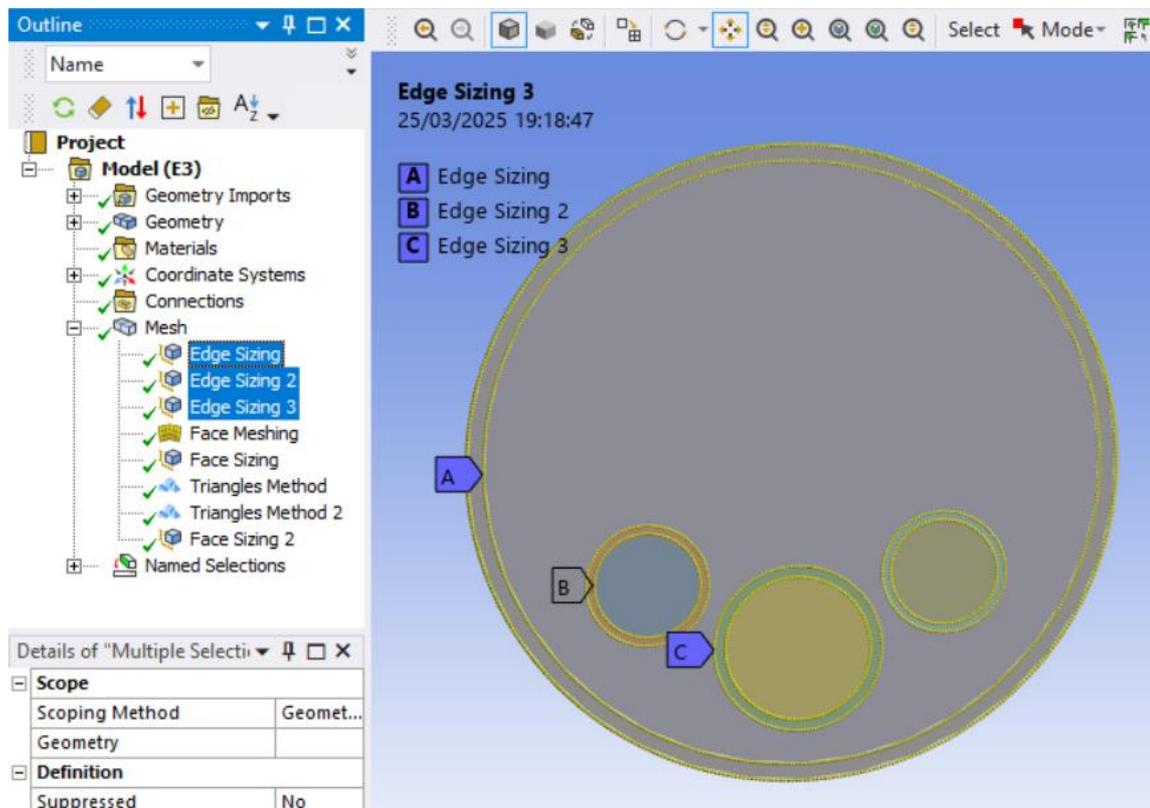
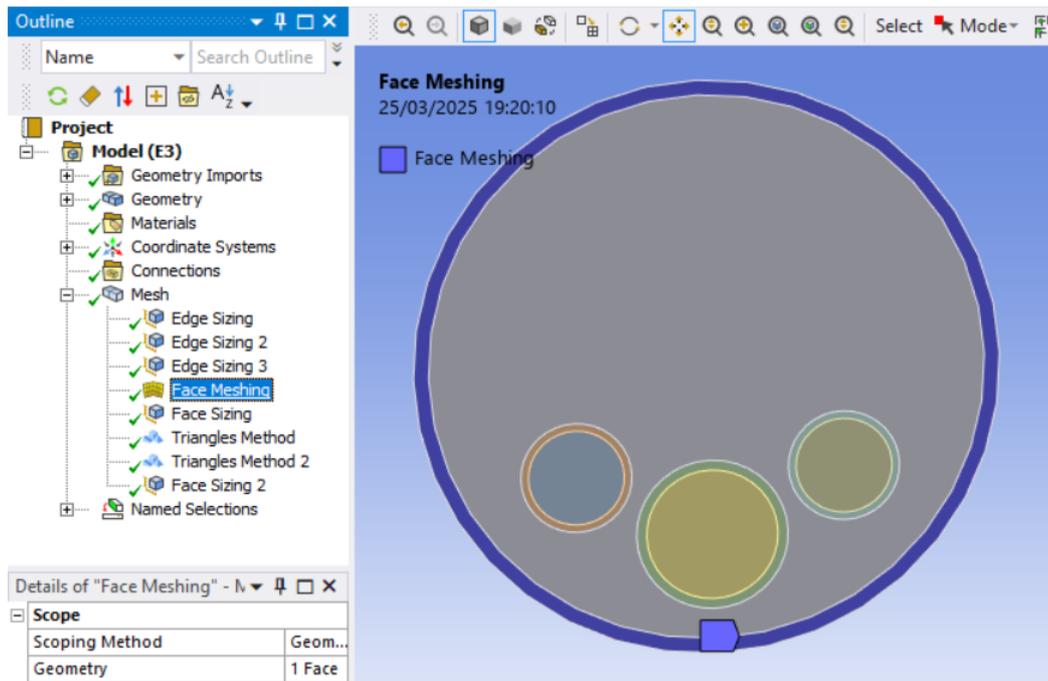


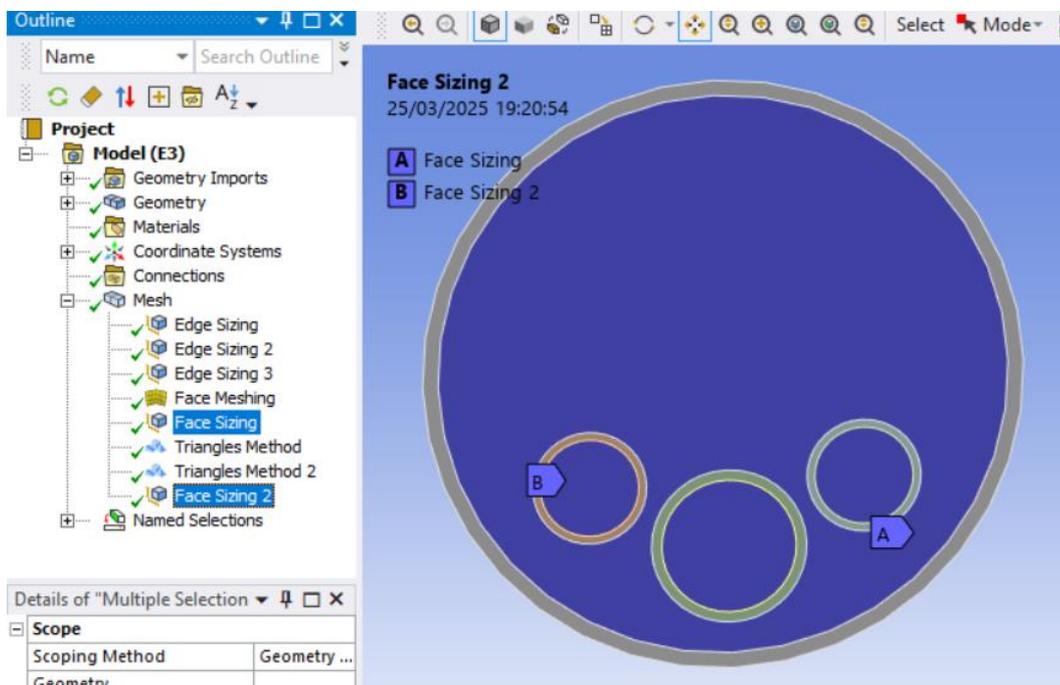
Figura 246. Tres *Edge Sizing* aplicados en el modelo

En este estudio, se han aplicado tres *Edge Sizing* para controlar el refinamiento de la malla en aristas clave

- *Edge Sizing*: Se ha asignado a las aristas circulares más grandes, dividiéndolas en 500 elementos.
 - *Edge Sizing 2*: Aplicado a las aristas de los tubos más pequeños, con una división de 100 elementos.
 - *Edge Sizing 3*: Utilizado en las aristas del tubo más grande, con 140 elementos.
- *Face Meshing*: Se ha utilizado para garantizar una distribución estructurada de la malla en la superficie sólida más externa, logrando una mejor conectividad y calidad de elementos en esa región.

Figura 247. *Face Meshing* aplicado en el modelo

- *Face Sizing*: Define el tamaño de los elementos en superficies específicas, permitiendo un mallado más uniforme y adaptado a las necesidades del estudio. Se ha aplicado al dominio fluido frío y al caliente, ambos con el método *Quadrilaterals* y con un tamaño de elemento de 5 mm.

Figura 248. Dos *Face Sizing* aplicados en el modelo

Gracias a la combinación de estas herramientas, se ha obtenido una malla lo suficientemente fina como para tener un equilibrio entre precisión y eficiencia computacional.

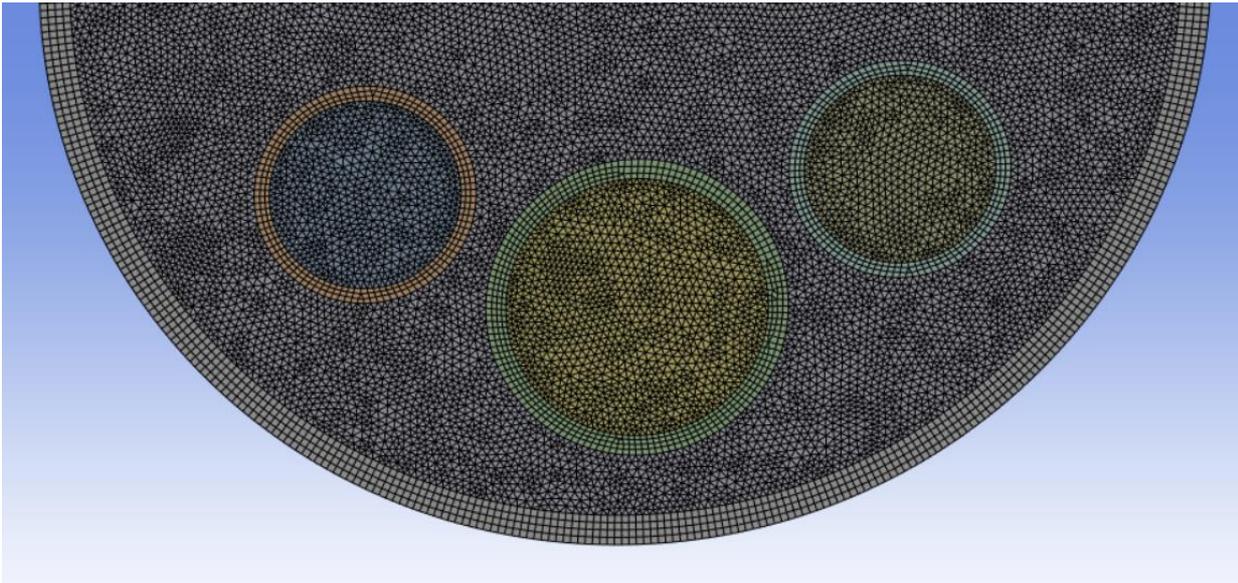


Figura 249 Detalle de la malla en modelo 2D

La calidad del mallado en este modelo bidimensional es superior a la del caso tridimensional debido a la menor complejidad geométrica, lo que evita la generación de elementos volumétricos distorsionados. Además, al no requerir un número excesivo de elementos, se reduce el costo computacional y se mejora la estabilidad numérica del análisis térmico, logrando una representación más precisa de la distribución del calor.

Al igual que en el estudio anterior, se crean los *Named Selections* correspondientes. En este caso, al pasar el problema a bidimensional, no se definen entradas ni salidas de flujo.

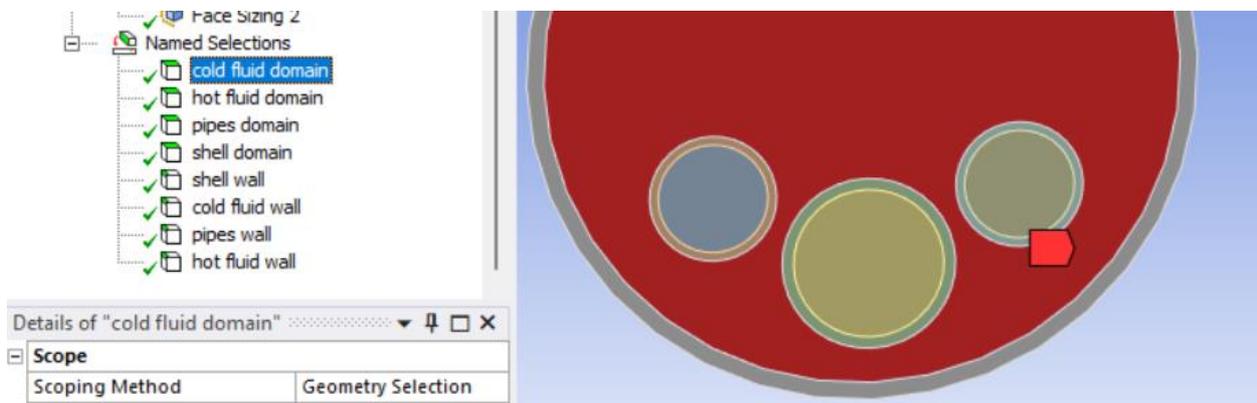
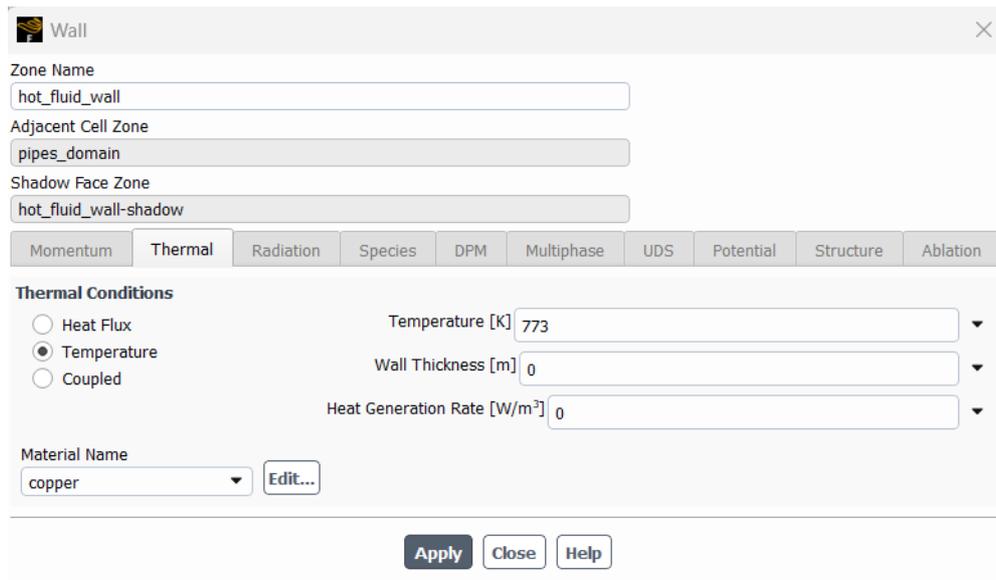


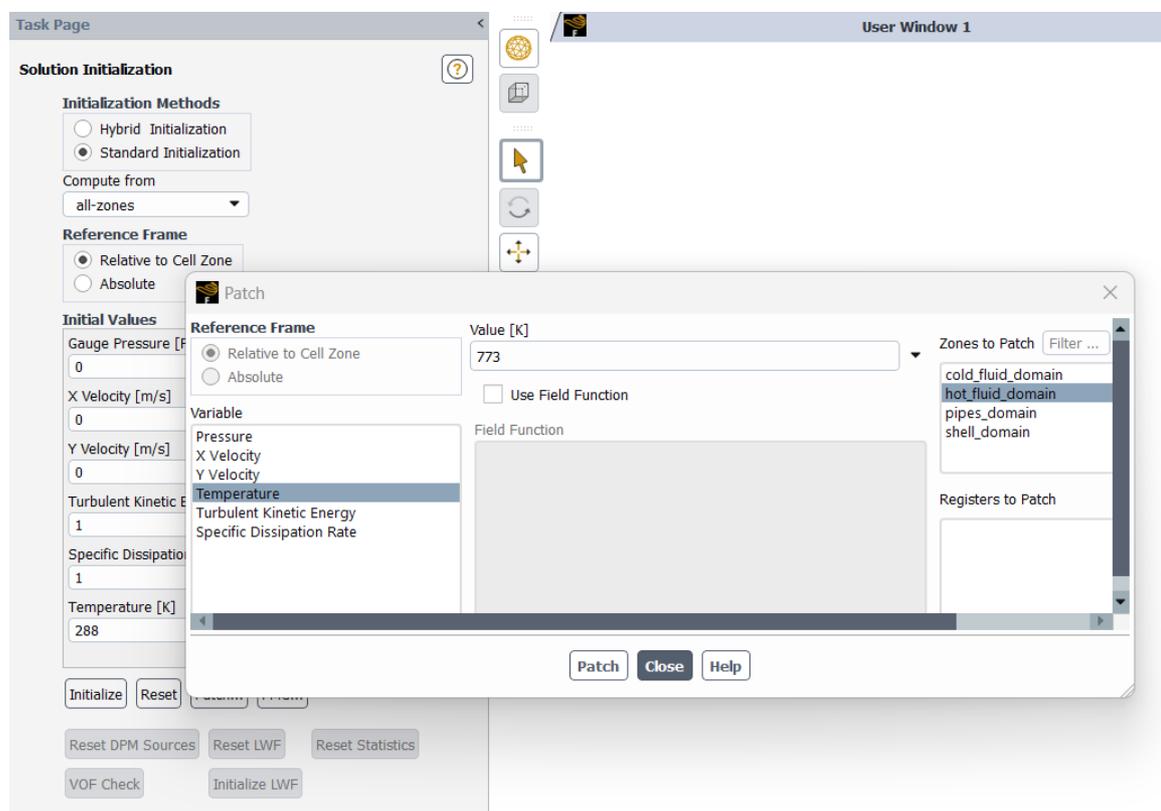
Figura 250. *Named Selections* del modelo 2D

7.3.3 Módulo *Fluent*

El módulo *Fluent* tampoco varía demasiado con respecto al estudio anterior. La principal diferencia radica en las condiciones de contorno: se ha establecido la pared del fluido caliente *hot_fluid_wall*, como temperatura fija de 773 K (500 °C), asignándole la misma temperatura que tendría el fluido de entrada. Esta modificación permite obviar el calentamiento del fluido y centrarse exclusivamente en el calentamiento de los tubos, y posteriormente en el agua y la carcasa.

Figura 251. Condición térmica en *hot_fluid_wall*

En cuanto a la inicialización, se ha establecido una temperatura inicial de 288 K en todas las zonas del modelo. Sin embargo, se ha aplicado un *patch* de temperatura en la zona del fluido caliente, elevando su temperatura a 773 K, para representar correctamente las condiciones térmicas del fluido en contacto con los tubos.

Figura 252. Inicialización estándar y aplicación de *Patch*

Después de la inicialización del modelo, se crea la animación que se desea obtener, centrada en la evolución de la temperatura en el sistema. Una vez definida la animación, se lanza la simulación. Dado que se espera una transmisión de calor más efectiva, se reduce considerablemente el time step a 0,2 segundos para capturar con mayor precisión los cambios térmicos y obtener una animación más fluida.

The image shows a software interface for configuring simulation parameters. The main section is titled "Run Calculation" and includes a "Calculate" button at the bottom. The "Time Advancement" section is set to "Fixed" type and "User-Specified" method. The "Parameters" section includes: "Number of Time Steps" (2500), "Time Step Size [s]" (0.2), "Max Iterations/Time Step" (10), "Reporting Interval" (1), and "Profile Update Interval" (1). The "Options" section has four unchecked checkboxes: "Extrapolate Variables", "Report Simulation Status", "Specify Solid Time Step Size", and "Loosely Coupled Conjugate Heat Transfer". The "Solution Processing" section has "Data Sampling for Time Statistics" unchecked and a "Data File Quantities..." button. The "Solution Advancement" section has a "Calculate" button.

Figura 253. Parámetros de *Run Calculation*

Tal y como se introdujo al comienzo del capítulo, este estudio se ha realizado en dos ocasiones, una utilizando cobre como material y otra con titanio, debido a que ambos son metales con propiedades térmicas muy distintas. El cobre, con una alta conductividad térmica, y el titanio, con una conductividad mucho más baja, ofrecen una comparación interesante para evaluar cómo estas diferencias afectan la efectividad de la transferencia de calor. Este enfoque permite analizar en detalle cómo las propiedades térmicas de cada material influyen en el rendimiento térmico del sistema.

7.4 Resultados obtenidos

Tras las diversas ejecuciones realizadas en ambos estudios, se han obtenido animaciones de contornos de temperatura, tal y como se configuró en el módulo *Fluent*. Estas animaciones muestran la evolución térmica del sistema a lo largo del tiempo, permitiendo observar cómo se distribuye el calor en los tubos, el agua y la carcasa.

Debido a la naturaleza dinámica de los resultados, no es posible plasmarlos de manera estática en un documento de lectura. A continuación, se incluirán algunas capturas de pantalla representativas del proceso, pero para una visualización más completa y detallada de los resultados, se recomienda consultar el video haciendo clic [aquí](#).

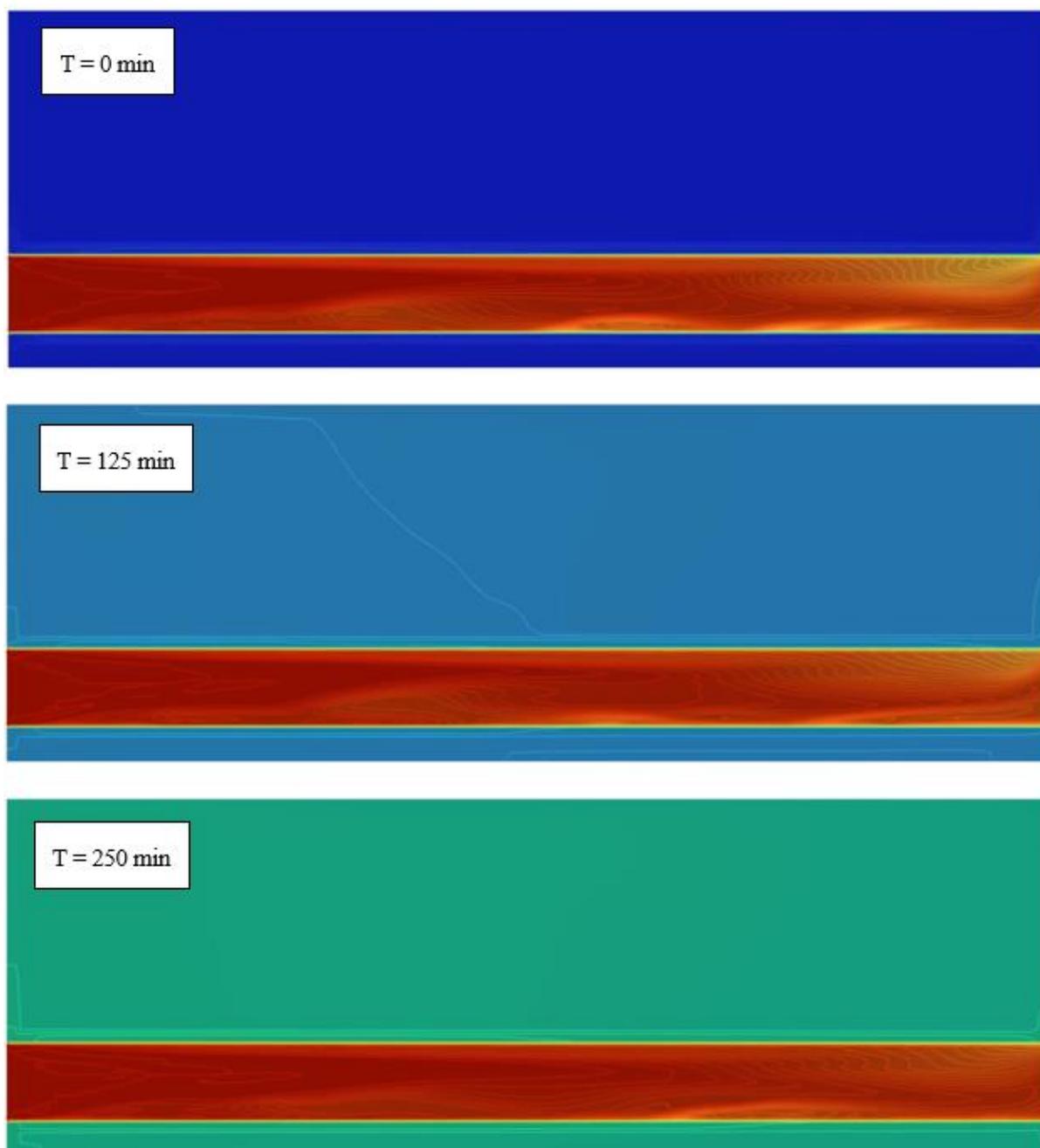


Figura 254. Evolución de temperatura en sección longitudinal - Estudio 1

La Figura 254 presenta tres contornos de temperatura en la sección longitudinal del tanque de agua, correspondientes a distintos instantes de tiempo del primer estudio realizado. El primero representa el estado inicial, el segundo muestra la evolución térmica en un momento intermedio, y el tercero ilustra la fase final, cuando el agua alcanza su temperatura de ebullición, que a una presión de 15 bar es de 471 K (198 °C).

La simulación se ha detenido en este punto para evitar la fase de evaporación del agua, ya que su modelado implicaría una mayor complejidad y una alta exigencia computacional. Además, este fenómeno no aporta información relevante para los objetivos del estudio.

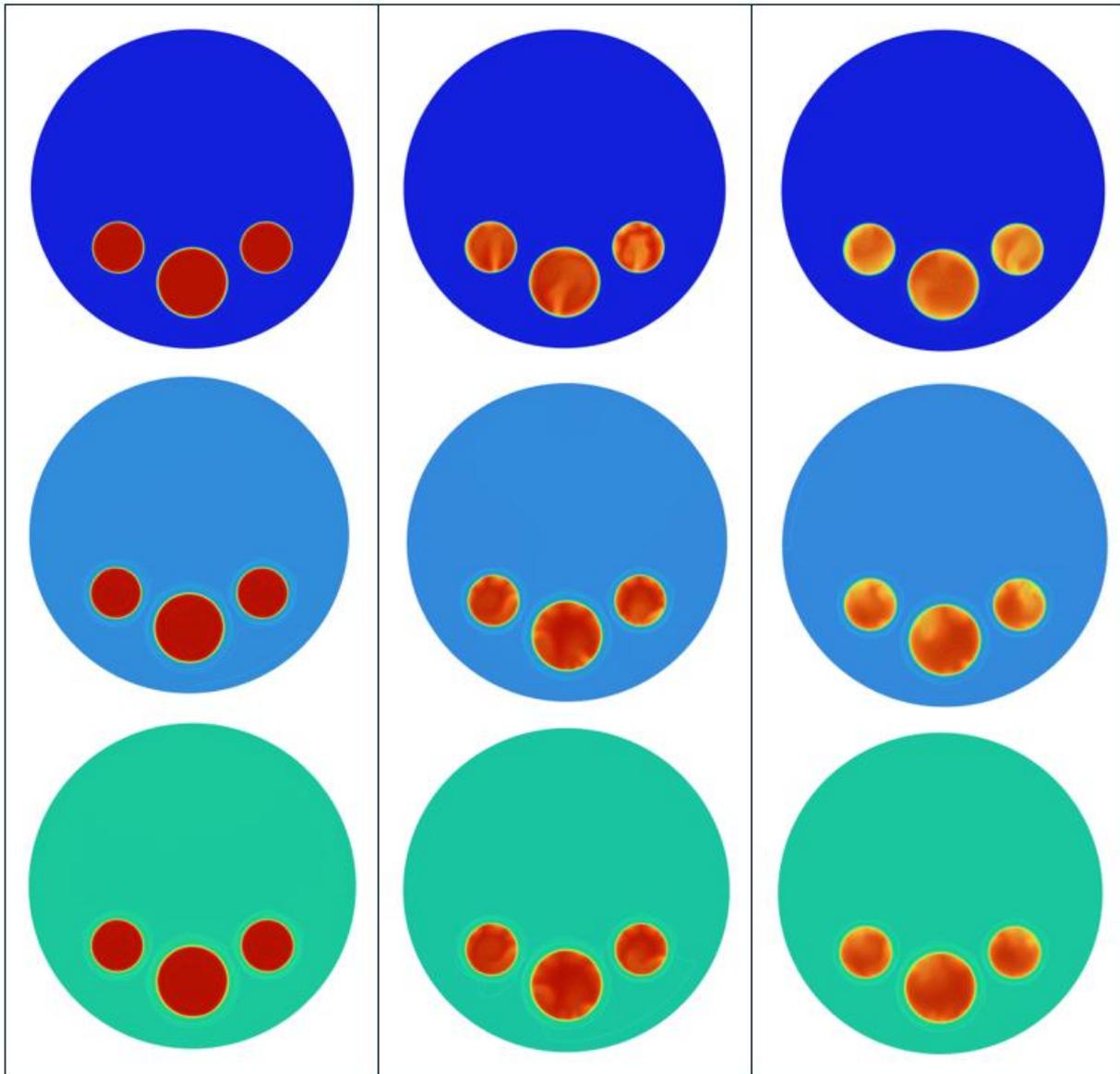


Figura 255. Evolución de temperatura en secciones transversales - Estudio 1

De manera similar, la imagen anterior muestra los contornos de temperatura del mismo estudio y en los mismos instantes de tiempo, pero en este caso en secciones transversales del depósito. La primera columna corresponde a una sección cercana a la entrada del gas caliente, la segunda a una posición intermedia dentro del tanque, y la tercera a una zona próxima a la salida del gas caliente.

Finalmente, la Figura 256 muestra los resultados del segundo estudio. La primera columna corresponde al

cobre y la segunda al titanio, representando en ambos casos tres instantes de tiempo: el inicial, uno intermedio y el momento en que la simulación del sistema modelado en cobre finaliza. Esto permite evaluar la influencia de cada material en la transmisión de calor.

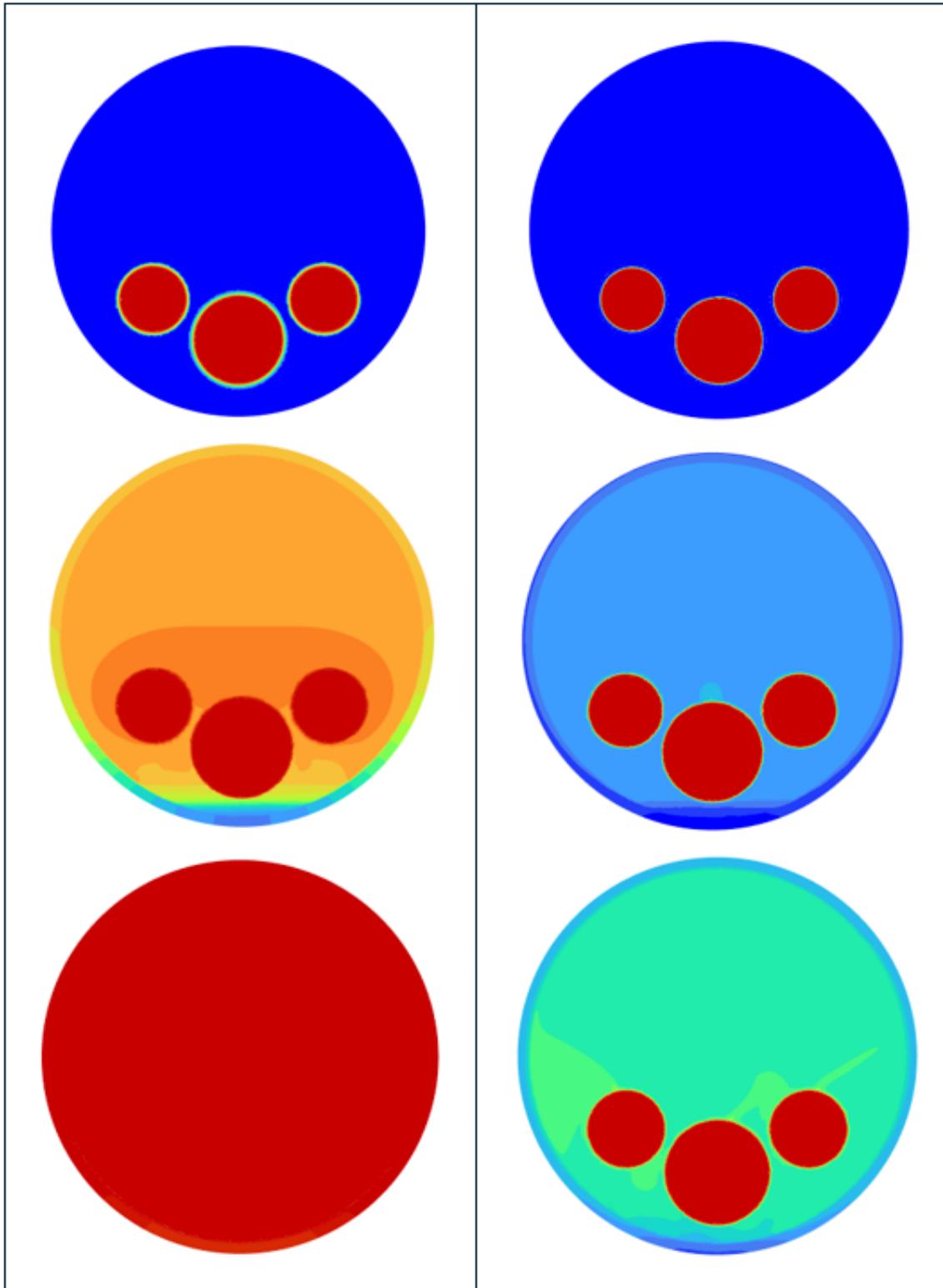


Figura 256. Evolución de temperatura en secciones transversales - Estudio 2

7.5 Análisis de los resultados obtenidos

Una vez completados los estudios experimentales, se procede al análisis de los resultados obtenidos. En este contexto, la transferencia de calor en el sistema de precalentamiento de agua se observa como un proceso progresivo que ocurre a medida que los gases calientes fluyen horizontalmente a través de la caldera. En las primeras etapas del proceso, la diferencia de temperatura entre el gas y el agua es la mayor de todas, lo que favorece una eficiente transferencia de calor en las zonas cercanas a la entrada del gas. El calor se transfiere desde atrás hacia adelante, siguiendo el sentido de marcha de la locomotora, y de abajo hacia arriba, debido a la disposición de los tubos dentro de la caldera. Este efecto se aprecia claramente en los contornos de temperatura de la sección longitudinal y el de la superficie exterior del tanque, mostrados en el vídeo.

El diseño horizontal del sistema, que permite que el gas fluya de forma paralela a las superficies de agua, es fundamental para este patrón de transferencia de calor. A pesar de que las zonas más distantes de la entrada del gas reciben una menor cantidad de calor debido a la disminución de la temperatura del gas, el sistema sigue siendo eficaz en su objetivo de calentar el agua hasta alcanzar su punto de ebullición. El flujo constante de gas y el contacto continuo con las superficies del agua aseguran que el calentamiento se logre de manera eficiente a lo largo de todo el recorrido.

Los mecanismos de transmisión de calor en este sistema incluyen convección forzada, conducción y convección natural, cada uno desempeñando un papel crucial en la eficiencia del proceso. Dentro de las tuberías, el gas caliente fluye a alta velocidad, lo que favorece la convección forzada. La alta velocidad del gas impide que se enfríe rápidamente, lo que permite que la transferencia de calor se produzca de manera eficiente a lo largo de todo el sistema, manteniendo una diferencia de temperatura significativa entre el gas y el agua durante el recorrido. Este movimiento del gas incrementa la tasa de transferencia de calor al permitir un contacto constante con las superficies de las tuberías. La conducción ocurre a través de las paredes de las tuberías y la carcasa del tanque, donde el calor se transfiere del gas caliente a las superficies metálicas de las tuberías, y luego de estas hacia el agua. Este proceso depende de la alta conductividad térmica de los materiales metálicos, como el cobre, que facilitan el paso del calor hacia el agua circundante. En el agua, el proceso de convección natural ocurre cuando el calor transferido desde las paredes de las tuberías calienta el agua circundante, disminuyendo su densidad y provocando su ascenso, mientras que el agua más fría desciende, creando un patrón de circulación que distribuye el calor a lo largo del depósito. Aunque la convección natural es menos eficiente que la forzada, permite una distribución continua del calor a medida que el agua se calienta. En conjunto, estos mecanismos aseguran una transferencia de calor eficiente desde los gases de escape hacia el agua, completando el calentamiento completo del tanque hasta los 471 K (198 °C) en aproximadamente 4 horas y 10 minutos. Dicho tiempo es coherente, considerando las condiciones del sistema y las simplificaciones aplicadas en el modelo.

Por otro lado, al analizar las diferencias entre los resultados de la simulación realizada con la caldera de cobre y la simulación con la caldera de titanio, se observa que el primero, al ser un excelente conductor térmico, permite una distribución de calor mucho más uniforme y rápida en comparación con el titanio, que es un conductor térmico menos eficiente. En el caso del cobre, el calor fluye rápidamente a través del material, reduciendo los gradientes de temperatura en las paredes del sistema y mejorando la transferencia de calor hacia el fluido. Por otro lado, el titanio, debido a su menor conductividad, muestra gradientes de temperatura más marcados y una menor transmisión de calor, lo cual limita la eficiencia térmica del conjunto. Esto justifica el uso de materiales de alta conductividad térmica en aplicaciones de intercambio de calor, ya que maximizan la transferencia de energía y contribuyen a un mejor rendimiento del sistema.

Lo ideal sería que las tuberías del sistema estuvieran hechas de cobre, debido a su excelente conductividad térmica, lo que permitiría una transferencia de calor rápida y eficiente desde los gases calientes hacia el agua. Sin embargo, la carcasa de la caldera debería ser de un material con baja conductividad térmica, como acero inoxidable o algún otro metal menos eficiente en la conducción de calor. Esto ayudaría a reducir las pérdidas de calor hacia el entorno exterior, mejorando así la eficiencia global del sistema.

En resumen, los resultados del análisis térmico indican que el sistema de precalentamiento basado en tuberías de cobre cumple con su función de manera efectiva, facilitando una significativa transferencia de calor desde los gases de escape hacia el agua.

8 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

El presente trabajo de fin de máster ha tenido como objetivo principal el modelado y la animación detallada de una locomotora de vapor utilizando CATIA V5, complementado por un estudio térmico exhaustivo del sistema de precalentamiento del agua en ANSYS Fluent. A lo largo de este proyecto, se ha logrado crear un modelo geométrico preciso y detallado de la locomotora, lo que resulta fundamental para la comprensión y visualización de su estructura y funcionamiento, así como para futuras optimizaciones en su diseño.

El uso de CATIA V5 ha permitido desarrollar un modelo tridimensional completo de la locomotora, abarcando todos sus componentes esenciales. Este proceso ha implicado la creación y ensamblaje de partes complejas, lo que resalta la capacidad de esta herramienta para manejar proyectos de ingeniería de gran envergadura. La animación del modelo no solo ha proporcionado una visualización dinámica de la locomotora en funcionamiento, sino que también ha facilitado la comprensión de los mecanismos internos y el movimiento coordinado de sus componentes. Esta visualización es clave para identificar oportunidades de mejora en el diseño y la eficiencia operativa del sistema.

El análisis térmico realizado con ANSYS Fluent ha complementado el modelado, permitiendo evaluar la eficiencia térmica del sistema de precalentamiento del agua y comprender la distribución de temperaturas a lo largo de las tuberías y el tanque. Los resultados indican que las tuberías más estrechas presentan una disminución de temperatura más rápida, lo que enfatiza la importancia de optimizar su diseño para mejorar la eficiencia del sistema de precalentamiento. Un sistema de precalentamiento eficiente es crucial, ya que permite un calentamiento más rápido del agua y, por ende, un uso más eficiente del combustible.

La distribución de temperaturas en la pared externa del tanque de agua también ha proporcionado información valiosa sobre la efectividad del aislamiento térmico y las posibles pérdidas de calor, afectando directamente el rendimiento del sistema. Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar soluciones de aislamiento mejoradas y optimizar la geometría de las tuberías para garantizar que el calor se transfiera de manera uniforme y efectiva a todo el volumen de agua.

Este trabajo no solo ha logrado su objetivo principal de modelar y animar una locomotora de vapor, sino que también ha generado una herramienta visual y técnica útil para el estudio y la mejora de este tipo de maquinaria. El análisis térmico ha añadido un valor significativo al proyecto, proporcionando características importantes sobre el comportamiento térmico del sistema de precalentamiento del agua. Este esfuerzo no solo contribuye al conocimiento técnico y práctico en el ámbito del modelado de locomotoras de vapor, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones y optimizaciones en el diseño y funcionamiento de estos sistemas.

De cara al futuro, se proponen varias líneas de desarrollo que podrían enriquecer este trabajo. En primer lugar, sería beneficioso definir los procesos de fabricación de cada una de las piezas con vistas a su posterior ensamblaje en un modelo físico a escala. Para facilitar este objetivo, se sugiere utilizar el módulo Machining de CATIA, lo que permitirá planificar y ejecutar la fabricación de los componentes de manera eficiente, dado que muchos de ellos son mecanizables.

Además, la incorporación de software de impresión 3D para generar y ensamblar el modelo a escala en resina se presenta como una opción atractiva. Esta estrategia permitiría realizar pruebas físicas y evaluaciones de diseño antes de la fabricación final.

Por último, la mejora y optimización del modelo se enfocaría en la modificación de parámetros y el rediseño de componentes críticos, como el sistema de precalentamiento. Este cambio busca obtener mayores eficiencias en el funcionamiento de la locomotora, resultando en un rendimiento optimizado y una reducción en el consumo de combustible.

REFERENCIAS

- [1] J. d. WAAL, «Modeles a vapeur,» [En línea]. Available: <https://www.modelesavapeur.com/telechargements5/brazil-jdwaal.pdf>. [Último acceso: 10 abril 2024].
- [2] Culturacientifica, «La máquina de vapor (1),» [En línea]. Available: <https://culturacientifica.com/2017/05/16/la-maquina-vapor-1/>. [Último acceso: 15 junio 2024].
- [3] Wikipedia, «Máquina de vapor,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor. [Último acceso: 15 junio 2024].
- [4] Britannica, «máquina de vapor,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/steam-engine>. [Último acceso: 15 junio 2024].
- [5] Nostrum, «Biela-manivela / Excéntrica-biela,» [En línea]. Available: https://www.iesmarenostrum.com/departamentos/tecnologia/mecanoso/mecanica_basica/mecanismos/mec_biela-manivela.htm. [Último acceso: 15 junio 2024].
- [6] MicadoAzul, «Forotrenes,» [En línea]. Available: <https://www.forotrenes.com/foro/viewtopic.php?t=36238>. [Último acceso: 15 junio 2024].
- [7] «GoogleDocs,» [En línea]. Available: https://docs.google.com/document/d/1MTDjkPZcmchinbxQBA_q0LPe1vCcR7Ek1qTcvvSHbR8/edit?tab=t.0. [Último acceso: 16 junio 2024].
- [8] Wikipedia, «Herón de Alejandría,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Her%C3%B3n_de_Alejandr%C3%ADa. [Último acceso: 16 junio 2024].
- [9] «AstroSabadell,» [En línea]. Available: https://astrosabadell.org/pdf/es/bio/homes/Hero_es.pdf. [Último acceso: 16 junio 2024].
- [10] ComputerHoy, [En línea]. Available: <https://computerhoy.20minutos.es/ciencia/eolipila-primera-maquina-vapor-2000-anos-utilidad-1318796>. [Último acceso: 16 junio 2024].
- [11] «Enseñanza de la física y la química,» [En línea]. Available: <http://www.heurema.com/TestF70N.htm>. [Último acceso: 16 junio 2024].
- [12] Wikipedia, «Thomas Savery,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery. [Último acceso: 16 junio 2024].
- [13] AQUAE Fundación, «AQUAE Fundación,» [En línea]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/quien-invento-la-maquina-de-vapor/>. [Último acceso: 16 junio 2024].

- [14] A. Castilla, «ECONOMÍA Y FUTURO,» [En línea]. Available: <https://economyayfuturo.es/la-maquina-de-vapor-thomas-savery-y-thomas-newcomen-3/>. [Último acceso: 17 junio 2024].
- [15] Britannica, «Thomas Savery,» [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/biography/Thomas-Savery>. [Último acceso: 17 junio 2024].
- [16] A hombros de gigantes. Ciencia y Tecnología, «El inventor de la primera máquina de vapor efectiva de la Historia; Newcomen,» [En línea]. Available: <https://ahombrosdegigantescienciaytecnologia.wordpress.com/2015/08/05/la-primera-maquina-de-vapor-efectiva-de-la-historia-newcomen/>. [Último acceso: 17 junio 2024].
- [17] Google, «Arts & Culture,» [En línea]. Available: <https://artsandculture.google.com/asset/m%C3%A1quina-de-vapor-de-newcomen/UQE2Zj-yM292hw?hl=es&ms=%7B%22x%22%3A0.5%2C%22y%22%3A0.5%2C%22z%22%3A8.846741268161644%2C%22size%22%3A%7B%22width%22%3A2.4957608537824094%2C%22height%22%3A1.2375264674474278%7D%7D>. [Último acceso: junio 21 2024].
- [18] Wikipedia, «James Watt,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/James_Watt. [Último acceso: 22 junio 2024].
- [19] Wikipedia, «Máquina de vapor de Watt,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor_de_Watt. [Último acceso: 22 junio 2024].
- [20] Interfoto, «Alamy,» [En línea]. Available: <https://www.alamy.com/stock-photo-watt-james-1911736-2581819-scottish-engineer-and-inventor-his-steam-47872686.html>. [Último acceso: 24 junio 2024].
- [21] Terránea, «James Watt, el inventor de los “caballos de fuerza”,» [En línea]. Available: <https://blog.terranea.es/james-watt-caballos-fuerza/>. [Último acceso: 22 junio 2024].
- [22] Google, «Arts & Culture,» [En línea]. Available: <https://artsandculture.google.com/entity/george-stephenson/m039ht?hl=es>. [Último acceso: 23 junio 2024].
- [23] Noticias de la Ciencia, «George Stephenson: Padre del ferrocarril,» [En línea]. Available: <https://noticiasdelaciencia.com/art/51782/george-stephenson-padre-del-ferrocarril>. [Último acceso: 23 junio 2024].
- [24] Wikipedia, «Blücher (locomotora),» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Bl%C3%BCcher_\(locomotora\)#:~:text=La%20Bl%C3%BCcher%20\(el%20nombre%20es,en%20el%20desarrollo%20de%20los](https://es.wikipedia.org/wiki/Bl%C3%BCcher_(locomotora)#:~:text=La%20Bl%C3%BCcher%20(el%20nombre%20es,en%20el%20desarrollo%20de%20los). [Último acceso: 24 junio 2024].
- [25] Wikipedia, «George Stephenson,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/George_Stephenson. [Último acceso: 25 junio 2024].
- [26] Wikipedia, «The Rocket,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/The_Rocket. [Último acceso: 25 junio 2024].
- [27] Wikipedia, «Ferrocarril de Liverpool y Mánchester,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Ferrocarril_de_Liverpool_y_M%C3%A1nchester. [Último acceso: 25 junio 2024].
- [28] M. Cartwright, «El ferrocarril en la Revolución Industrial británica,» [En línea]. Available: <https://www.worldhistory.org/trans/es/2-2167/el-ferrocarril-en-la-revolucion-industrial-britani/>.

[Último acceso: 26 junio 2024].

- [29] J. M. V. Martín, «El papel de los ferrocarriles en la historia y el futuro de la logística,» [En línea]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/el-papel-de-los-ferrocarriles-en-la-historia-y-futuro-vicente-mart%C3%ADn-n3imf/>. [Último acceso: 27 junio 2024].
- [30] Eusitrade, «Historia y evolución de la combustión interna,» [En línea]. Available: <https://eusitrade.com/historia-combustion-interna>. [Último acceso: 27 junio 2024].
- [31] Motorba, «El motor de las locomotoras: una mirada al corazón del tren,» [En línea]. Available: <https://motorba.com.ar/como-es-el-motor-de-una-locomotora/>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [32] Wikipedia, «Kerr, Stuart y compañía,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Kerr,_Stuart_and_Company#Narrow_gauge_designs. [Último acceso: 29 junio 2024].
- [33] Wikipedia, «0-4-2,» [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/0-4-2>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [34] Wikipedia, «Bogie,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Bogie>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [35] Wikipedia, «Componentes de una locomotora de vapor,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Componentes_de_una_locomotora_de_vapor. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [36] Club Ferroviari Vaporista de Mallorca, «Manejo, encendido y mantenimiento,» [En línea]. Available: <http://www.cfv.es/vercategoria.php?id=639>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [37] Altap, «¿Qué mantenimiento debe hacerse a las máquinas y equipos de alta presión?,» [En línea]. Available: <https://www.altap.org/informacion/aplicaciones-del-agua-a-alta-presion-en-construccion/que-mantenimiento-debe-hacerse-a-las-maquinas-y-equipos-de-alta-presion>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [38] SCRIBD, «Manual de encendido de una locomotora de vapor,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/737299025/Manual-de-encendido-de-una-locomotora-de-vapor>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [39] Aguamarket, «Caldera,» [En línea]. Available: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=3050>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [40] LCTM, «El funcionamiento de las máquinas de Vapor,» [En línea]. Available: https://www.lctm.info/Secciones/Trenes/Tecnica/IFu_Vapor/index.php. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [41] Google Patentes, «Dispositivo de control de operador para una transmisión infinitamente variable,» [En línea]. Available: <https://patents.google.com/patent/MXPA01000284A/es>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [42] MiMaquetaZ, «Conduciendo locomotoras,» [En línea]. Available: <https://mimaquetaz.blogspot.com/2014/03/conduciendo-locomotoras.html>. [Último acceso: 28 junio 2024].

- [43] Wikipedia, «Biela-manivela,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Biela-manivela>. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [44] Wikipedia, «Biela de acoplamiento,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Biela_de_acoplamiento. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [45] Wikipedia, «Locomotora de vapor,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Locomotora_de_vapor. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [46] Wikipedia, «Tiro de escape de vapor,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Tiro_del_escape_de_vapor. [Último acceso: 28 junio 2024].
- [47] Wikipedia, «Silbato,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Silbato#:~:text=El%20silbato%20act%C3%BAa%20al%20hacer,base%2C%20se%20produce%20el%20silbido..> [Último acceso: 28 junio 2024].
- [48] Wikipedia, «CATIA,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/CATIA#:~:text=CATIA%20fue%20desarrollado%20en%201971,el%20a%20vi%C3%B3n%20de%20combate%20Mirage..> [Último acceso: 30 junio 2024].
- [49] DASSAULT SYSTEMES, «CATIA,» [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/products/catia/catia-v5>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [50] Wikipedia, «CATIA logo,» [En línea]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:CATIA_logo.svg. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [51] MasterCAD, «Animación Cinemática en CATIA V5,» [En línea]. Available: <https://mastercad.com.mx/blog/f/animaci%C3%B3n-cinem%C3%A1tica-con-catia-v5?blogcategory=Catia+V5>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [52] fracttal, «Interoperabilidad y gestión de datos: Un camino hacia la integración,» [En línea]. Available: <https://www.fracttal.com/es/blog/que-es-la-interoperabilidad>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [53] Wikipedia, «AutoCAD,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [54] Wikipedia, «SolidWorks,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [55] LOGONOID, [En línea]. Available: <https://logonoid.com/solidworks-logo/>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [56] Wikipedia, «Autodesk Inventor,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Inventor. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [57] Pinterest, «Autodesk Inventor Logo,» [En línea]. Available: <https://in.pinterest.com/pin/268456827780030445/>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [58] ptc, «Software de modelado 3D Creo Parametric,» [En línea]. Available: <https://www.ptc.com/es/products/creo/parametric>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [59] Wikipedia, «Archivo : PTC Creo logo.svg,» [En línea]. Available:

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PTC_Creo_logo.svg. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [60] Wikipedia, «Solid Edge,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Solid_Edge. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [61] X-Plan, «solid-edge-logo,» [En línea]. Available: <https://www.x-plan.com/soporte-y-descargas/solid-edge-logo/>. [Último acceso: 30 junio 2024].
- [62] N. y. Soler, «nysplm,» [En línea]. Available: <https://www.nysplm.com/ansys/>. [Último acceso: 1 julio 2024].
- [63] Integral Innovation Experts, «Ansys,» [En línea]. Available: <https://integralplm.com/ansys/?srsltid=AfmBOornau5wfFvsk6qqQTLPW-0Rgu4mpTperuWxi8PdfzA7KBnCVUk>. [Último acceso: 1 julio 2024].
- [64] oshlumlh, «Oficina de Software y Hardware Libre,» [En línea]. Available: <https://oshl.umh.es/2014/06/02/openfoam/>. [Último acceso: 1 julio 2024].
- [65] Wikipedia, «Archivo:OpenFOAM logo.svg,» [En línea]. Available: https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:OpenFOAM_logo.svg. [Último acceso: 1 julio 2024].
- [66] Wikipedia, «COMSOL Multiphysics,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics. [Último acceso: 1 junio 2024].
- [67] Indiamart, «Software multifísico ComsolComsol Multiphysics Software,» [En línea]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/comsol-multiphysics-software-2357627573.html?mTd=1>. [Último acceso: 1 julio 2024].
- [68] Wikipedia, «Centro de simulación STAR-CCM+,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Simcenter_STAR-CCM%2B. [Último acceso: 1 julio 2024].
- [69] Universidad de los Andes, [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ftecnologia.uniandes.edu.co%2Fstar-ccm%2F&psig=AOvVaw1JG8F-19qVgsf3wiQBENX0&ust=1730042958317000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBcQjhxqFwoTCID51rGurIkDFQAAAAAdAAAAABAE>. [Último acceso: 1 julio 2024].
- [70] Wikipedia, «Simulación de Autodesk,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Simulation. [Último acceso: 1 julio 2024].
- [71] NexGenSolutions, [En línea]. Available: <data:image/png;base64,iVBORw0KGgoAAAANSUUhEUgAAAfYAAABkCAMAAABD7OJyAAABAlBMVEX///8AAAD/awCTPAD/1Uitra2RNgcweWda2tqMOQDiXwD/lEX/bgv/qGyOLgDQsaL/eC2S2wC+vr53d3f/ZgA1NTUgICDPz8/YQCpqaloaGiCgoJNTU2goKDu7u4ICAj/kFT/nm9AQED/18P29va5ubmKioo3Nzfk5OT/49QeHh7AlYHly>. [Último acceso: 1 julio 2024].

